МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
Казахский национальный технический университет имени К.И.Сатпаева

Каржаубаев Адил Сагинбекович

Восстановление чугунных коленчатых валов методом широкослойной наплавкой



Алматы 2015

УДК 621.824.32: 621.791.92
ББК 34.43
К22
Каржаубаев А.С.

К22 Восстановление чугунных коленчатых валов методом широкослойной наплавкой: Монография / Каржаубаев Адил Сагинбекович. Алматы: 2015.

ISBN 978-601-228-147-7

В монографии рассмотрены теоретические и экспериментальные исследования рабочих процессов широкослойной наплавки чугунных коленчатых валов с введением в дугу специального состава ферромагнитной шихты, выявлены закономерности влияния режимных параметров наплавки на физико-механические и эксплуатационные свойства восстанавливаемых валов, изложены научно-обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в повышение эффективности ремонта автомобильной техники, имеющей важное значение для экономики страны.

Книга предназначена для инженеров – конструкторов и научных работников машиностроительных, научно – исследовательских организации, а также может быть полезной для преподавателей, докторантов, магистрантов и студентов технических специальностей.

УДК 621.824.32: 621.791.92
ББК 34.43

РЕЦЕНЗЕНТЫ: д.т.н., профессор Мендебаев Т.М.
д.т.н., профессор Поветкин В.В.

© Каржаубаев А.С., 2015
© Издательство 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Введение……..5

Глава I Современное состояние технологии и процессов восстановления чугунных коленчатых валов автотракторных двигателей……6

1.1 Коленчатые валы автотракторных двигателей – как объект исследований ……6
1.2 Существующие способы восстановления коленчатых валов…….11
1.3 Особенности процесса восстановления чугунных коленчатых валов и используемые присадочные материалы……....14
Выводы…….26

Глава II Теоретические основы определения физико-механических свойств наплавленных чугунных коленчатых валов и разработка методик и их испытаний……..27

2.1 Обоснование и выбор способа восстановления чугунных коленчатых валов……27
2.2 Теоретические основы износа в парах трения коленчатых валов……..30
2.3 Методика экспериментального определения износа наплавленных шеек коленчатых валов……...35
2.4 Теоретические основы усталостной прочности чугунных коленчатых валов……... 43
2.5 Методика проведения испытаний на усталостную прочность коленчатых валов…… 54
2.6 Методика проведения эксплуатационных испытаний чугунных коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53 с восстановленными шейками……..64
Выводы…….69

Глава III Экспериментальные исследования по наплавке шеек чугунных коленчатых валов и оценка их износостойкости, усталости и долговечности……70

3.1 Технологический процесс восстановления коленчатого вала двигателя ЗМЗ-53……70
3.2 Исследования физико-механических свойств наплавленного слоя шеек чугунных коленчатых валов……76
3.3 Исследования износостойкости восстановленных чугунных коленчатых валов двигателя ЗМЗ-53…….85
3.4 Исследование усталостной прочности восстановленных чугунных коленчатых валов двигателя ЗМЗ-53…….88
3.5 Эксплуатационные испытания восстановленных чугунных коленчатых валов двигателя ЗМЗ-53…….96
Выводы……...107

Глава IV Планирование и обработка результатов экспериментальных исследований по наплавке чугунных коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53 и их внедрение в производство……..109

4.1 Методика планирования экспериментальных исследований……...109
4.2 Обработка результатов эксперимента……117
4.3 Методика оптимизации режима наплавочного процесса……...121
4.4 Внедрение разработанной технологии восстановления чугунных коленчатых валов……..126
4.5 Определение экономической эффективности при восстановлении чугунных коленчатых валов по разработанной технологии……129
Выводы……132

Заключение……..133
Список использованных источников……135
Приложения……143

Введение

В соответствие со стратегическим планом развития экономики Республики Казахстан на 2005-2010 годы выделено одним из главных направлений – создание высокотехнологичной агропромышленности [1,2,3].

Обеспеченность ремонтного производства запасными частями является главным фактором повышения технической готовности автомобильного парка. Расширение производства новых запасных частей связано с увеличением материальных и трудовых затрат. Вместе с тем около 75% деталей, выбраковываемых при первом капитальном ремонте автомобилей, являются ремонтопригодными либо могут быть использованы вообще без восстановления.

Поэтому целесообразной альтернативной расширению производства запасных частей является вторичное использование изношенных деталей, восстанавливаемых в процессе ремонта автомобилей и их агрегатов. Из ремонтной практики известно, что большинство выбракованных по износу деталей теряют не более 1-2% исходной массы.

При этом прочность деталей практически сохраняется. Известно, что 95% деталей двигателей внутреннего сгорания выбраковывают при износах, не превышающих 0,3 мм и они могут быть вторично использованы после восстановления.

С позиции воспроизводства машин экономическая целесообразность ремонта обусловлена возможностью повторного использования большинства деталей как годных, так и предельно изношенных после восстановления. Это позволяет осуществлять ремонт в более короткие сроки с меньшими затратами металла и других материалов по сравнению с затратами при изготовлении новых деталей.

В сельском хозяйстве Республики Казахстан эксплуатируются десятки тысяч автомобилей, тракторов и комбайнов. Обновление этого парка машин идет очень медленно из-за недостатка средств у фермеров республики. Поэтому на данном этапе единственным путем продления срока службы этих машин является их ремонт.

Одной из дорогостоящих деталей двигателей автомобилей, тракторов, комбайнов является коленчатый вал. Коленчатые валы автотракторных двигателей в настоящее время восстанавливаются различными видами наплавки. Технология восстановления стальных коленчатых валов разработана достаточно хорошо и не вызывает больших проблем. Чугунные коленчатые валы находят всё большее применение и их восстановление вызывает определенные сложности в силу особенностей высокопрочного чугуна, поэтому разработка метода восстановления чугунных коленчатых валов автотракторных двигателей является актуальной задачей [4], решение которой позволит создать высокоэффективную технологию ремонта коленчатых валов, а также расширить область научного познания теории и практики применения способа наплавки с высокими энергетическими показателями.

Работа выполнена по целевой научно-технической программе Министерства науки и новых технологий Республики Казахстан

«Создание высокоэффективных технологий, машин и оборудования» (№04-1-1/1015 от 03.08.1995г.)

Глава I Современное состояние технологии и процессов восстановления чугунных коленчатых валов автотракторных двигателей

1.1 Коленчатые валы автотракторных двигателей – как объект исследований

В настоящее время в автотракторных двигателях широкое применение получили литые коленчатые валы из высокопрочных чугунов, которые в сравнении со стальными валами более дешёвы в производстве и по своим прочностным свойствам не уступают стальным валам.

Вопросами ремонта коленчатых валов автотракторной техники в СССР и Казахстане занимались ряд научно-исследовательских институтов и учебных заведений: КазНИИПИАТ, ГосНИИАТ, КазСХИ (ныне КазНАУ) и другие.

В основу восстановления шеек коленчатых валов легли сварочные процессы – наплавка с введением в дугу различных шихтовых присадок. Теория и практика восстановления коленчатых валов отражена в работах ведущих учёных СССР и Казахстана: Патона Э.О., Рыкалина Н.Н., Петрова Г.Л., Сидорова А.И., Винокурова В.А., Иминова М.У., Бисекен А.Б. и др. [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19]. Рядом авторов поставлены и решены задачи повышения работоспособности деталей сельхозмашин и автотракторной техники, с применением мощных электродуговых источников тепла в среде защитных газов и применением специальных электродов и порошковых материалов, для сварки разнородных материалов: чугун-сталь, чугун-бронза и т.п. [20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30].

Однако зачастую имеет место хрупкое разрушение шеек коленчатых валов дизелей 5Д49, изготовленных из высокопрочного чугуна. Подшипники таких двигателей работают в режиме смешанной смазки (граничная и жидкостная) при установившихся режимах. У них при образовании аварийной ситуации в предзадирном состоянии изнашивается тонкий слой свинцово-оловянного покрытия, и при трении о свинцовистую бронзу подплавляется медь и под её влиянием происходит хрупкое разрушение шеек валов [10, 31].

Для образования и последующего развития трещины, под влиянием расплавленной меди на участках контактирования её, должна быть чистая (ювенальная) поверхность, возможность образования которой достаточно велика в связи с упругопластическим взаимодействием на отдельных участках металлических поверхностей. При образовании таких участков расплавленная медь резко снижает свободную поверхностную энергию, и уровень действующих напряженийё оказывается чрезвычайно высоким. Это обуславливает большую скорость разрыва атомных связей и образования новой поверхности. Немалую роль в этом случае оказывают дефекты структуры, которые обладая избыточной свободной энергией, могут интенсивно

адсорбировать инородные атомы и помогать транспортировке их внутрь металла к новым зародышевым поверхностям [32, 33].

Применительно к литому чугунному коленчатому валу (рисунок 1.1) такими дефектами являются не только границы зёрен, но и большое количество графитовых включений, фосфидной эвтектики, цементита и др. Один из таких участков, где медь проходила по графитовым включениям, представлен на рисунке 1.2.

Образование трещин и последующее развитие их осуществляется при достаточном количестве жидкого металла, определяемом прохождением поверхностной диффузии, распространением расплава вдоль стенок трещин и впитыванием металла стенками образующейся трещины. Трещины большей длины образуются при расходовании жидкого расплава в направлении фронта трещины (в её вершине), а при малом поглощении жидкого металла – её стенками. Необходимым условием образования трещины является наличие растягивающих напряжений; трещина не развивается на участках, испытывающих сжимающие напряжения.



Рисунок 1.1 – Коленчатый вал.

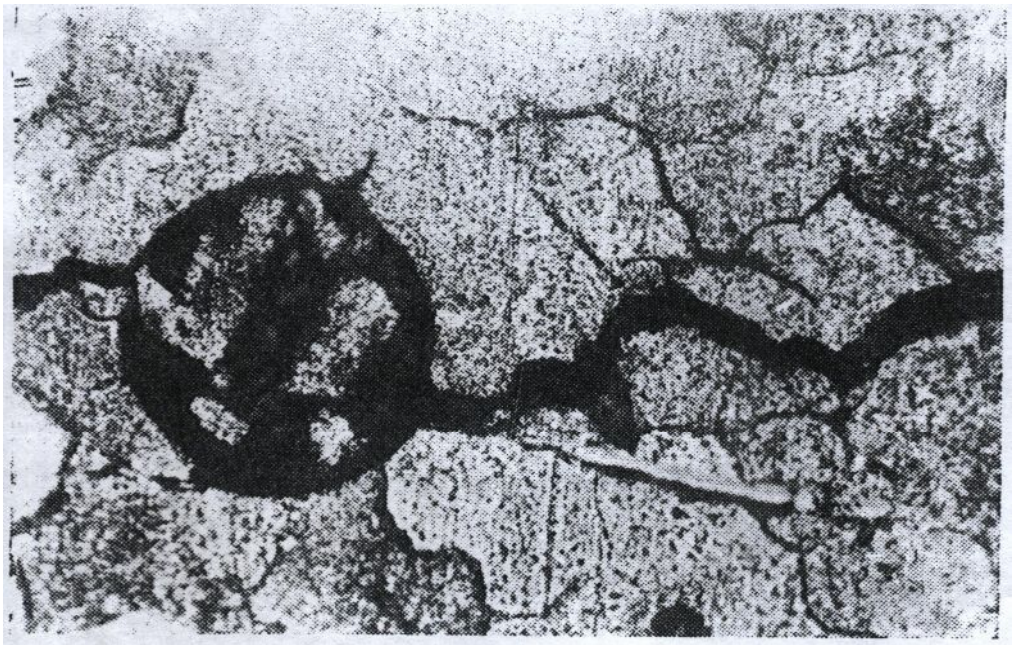


Рисунок 1.2 – Микростроение участка высокопрочного чугуна, графитовые зёрна которого являлись очагами транспортировки меди (Х500)

В присутствии жидкого металла трещина распространяется, как правило, по межзёренным границам. Такой характер разрушения объясняется тем, что границы раздела обладают избыточной свободной поверхностной энергией и атомы адсорбционно-активного расплава, адсорбируясь на межзёренных границах, снижают их поверхностную энергию, способствуя тем самым снижению прочности металла [34, 35, 36].

Кроме того, следует учитывать, что для зарождения трещины необходимо скопление дислокаций перед препятствием в плоскости скольжения. Границы зёрен являются как раз труднопреодолимыми препятствиями на пути их движения. Одновременно сами границы зёрен состоят из большого количества дефектов, которые удобны для диффузии атомов расплава с поверхности в глубь металла.

Снижение прочности под влиянием адсорбционно–активного расплава возрастает по мере увеличения исходной прочности (твёрдости) металла. Применительно к влиянию расплава это было доказано в работах С.Т. Кишкина, Я.М. Потока, У. Ростокера и других.

Коленчатые валы автотракторных двигателей изготавливают штамповкой из сталей 40, 45 и 50 с более суженными пределами содержания углерода (стали селект), с повышенным содержанием марганца – сталь 50Г и литьём из магниевого чугуна с шаровидным графитом марок ВЧ-50-1,5 и ВЧ-60-2 [37, 38].

Для получения необходимой твёрдости и износостойкости шейки стальных коленчатых валов подвергают закалке ТВЧ с охлаждением, обеспечивающим самоотпуск на твёрдость 56…60HRC[4]. Глубина закалённого слоя 3…6,5 мм. Закалённый слой не доходит до галтелей на 6 мм (коленчатый вал ЗИЛ-130). Чугунные валы нагревают до 640…660 ˚ С, выдерживают 3…4 часа и охлаждают на воздухе (коленчатый вал ГАЗ-53)[4]. Твёрдость – 40…50 HRC. Шероховатость поверхности шеек соответствует 9 и 9б классу. Коленчатые валы работают в паре с подшипниками скольжения из антифрикционных материалов – баббиты, свинцовистая бронза и алюминиевые сплавы [10, 39].

Ниже приводится характеристика трущихся материалов в узлах трения коленчатых валов.

В промышленности и на транспорте в качестве антифрикционных материалов в основном применяют три группы сплавов [39]:

- мягкие легкоплавкие баббиты (сплавы на основе свинца и олова);
- медные;
- алюминиевые и цинковые.

Состав баббитов по ГОСТ 1320-74 представлен в таблице 1.1.

Традиционными антифрикционными сплавами являются сплавы на основе меди, к числу которых относятся оловянные и безоловянные бронзы. Более прочные бронзы используются для подшипников в монометаллическом исполнении, а менее прочные, содержащие повышенное количество свинца, применяются в биметаллических подшипниках.

Составы наиболее применительных оловянных бронз, используемых в монометаллических подшипниках, представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.1 – Состав баббитов для узлов трения коленчатых валов

Марка баббита	Содержание основных компонентов, %						
	Sn	Sb	Cu	Cd	Ni	Al	Pb
Б88	Остальное	7,3-7,8	2,5-3,5	0,8-1,2	0,15-0,25	-	-
Б83	»	10,0-12,0	5,5-6,5	-	-	-	-
Б83С	»	9,0-11,0	5,0-6,0	-	-	-	1,0-1,5
Б16	15,0-17,0	15,0-17,0	1,5-2,0	-	-	-	Остальное
БН	9,0-11,0	13,0-15,0	1,5-2,0	0,1-0,7	0,1-0,5	0,5-0,9	»
БС6	5,5-6,5	5,5-6,5	0,1-0,3	-	-	-	»

Таблица 1.2 – Оловянно-свинцовые бронзы для узлов трения коленчатых валов.

Марка бронзы	Основные компоненты, %		
	Sn	Zn	Pb
Стандартные бронзы			
БрОЦСН3-7-5-1*	2,5-4,0	6,0-9,5	3,0-6,0
БрОЦС3-12-5	2,0-3,5	8,0-15,0	3,0-6,0
БрОЦС5-5-5	4,0-6,0	4,0-6,0	4,0-6,0
БрОЦС4-4-17	3,5-5,0	2,0-6,0	14,0-20,0
БрОЦС3,5-7,5	3,0-4,5	6,0-9,5	3,0-6,0
Нестандартные бронзы			
БрОЦ10-2	9,0-11,0	1-3,0	-
БрОФ10-1**	9,0-11,0	-	-
БрОС10-10	9,0-11,0	-	6,0-11,0
БрОС16-5	15,0-17,0	-	4,0-6,0
БрОС8-12	7,0-9,0	-	11,0-13,0
* Содержит 0,5 -2,0 % Ni			
** Содержит 0,4 -1,0 % P			

Наиболее распространёнными сплавами для биметаллических подшипников являются бронза, содержащая 30 % Pb (БрС-30) и оловянно-свинцовистая бронза БрОС1-22.

За последние годы резко возросло использование алюминиевых антифрикционных сплавов, обладающих достаточной усталостной прочностью, коррозионной стойкостью, высокой задиростойкостью и хорошей

антифрикционностью. Используются алюминиевые сплавы, как в биметаллическом, так и в монометаллическом исполнении, хотя и в значительно меньшем количестве.

Составы сплавов на алюминиевой основе приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Состав сплавов на алюминиевой основе для узлов трения коленчатых валов.

Группа	Марка сплава	Ni	Mg	Sb	Cu	Si	Sn	Ti
I	АН-2,5	2,7-3,3	-	-	-	-	-	-
	АСМ	-	0,3-0,7	3,5-6,5	-	-	-	-
II	АО9-1	-	-	-	1,0	-	9,0	-
	АО3-1	0,4	-	-	1,0	1,85	3,0	-
	АО9-2	1,0	-	-	2,25	0,5	9,0	-
	АО9-2Б	-	-	-	1,75	-	9,0	0,02-0,1
	АО20-1	-	-	-	1,0	-	20,0	0,02-0,1

Подшипники, изготовленные со слоем баббита, нередко выходят из строя по усталостным разрушениям. Использование более прочных подшипников со слоем свинцовистой бронзы также не всегда обеспечивает надёжную работу вкладышей из-за низкой сопротивляемости коррозии под воздействием масла и низкой задира стойкости.

Поэтому наибольшее распространение получили подшипники со слоем из алюминиевых сплавов, вследствие лучших эксплуатационных свойств и большей экономичности [39].

Коленчатый вал двигателя внутреннего сгорания работает в условиях действия переменных сил и моментов от давления газов в цилиндре двигателя, инерционных сил из-за неравномерности движения деталей шатунно-поршневой группы и вибраций от крутильных и изгибающих колебаний вала [39].

Под влиянием одновременного воздействия давления газов и сил инерции (а также их моментов) в коленчатом вале возникают циклически изменяющиеся напряжения кручения и изгиба. Напряжения кручения могут достигать очень большой величины, особенно в случае совпадения частоты изменения возбуждающей их силы с частотой собственных крутильных колебаний вала. Это приводит к образованию в наиболее напряжённых местах усталостных трещин, развитие которых может вызвать поломку вала.

Разрушение коленчатых валов от усталости начинается обычно у выходного отверстия для смазки на коренных и шатунных шейках и у галтелей в сопряжениях шеек со щеками. Запас усталостной прочности для автотракторных валов невелик и равен 1,5…3,0 [10]. Поэтому усталость может явиться лимитирующим фактором, определяющим служебную долговечность вала, её выносливость.

1.2 Существующие способы восстановления коленчатых валов.

Изношенные коленчатые валы двигателей, имеющие овальность, конусность шеек, зазоры в подшипниках, превышающие величины, указанные в типовой технологии, восстанавливаются шлифованием под ремонтные размеры.

Коленчатые валы, имеющие износ шеек ниже последнего ремонтного размера, восстанавливаются различными методами [12, 41].

Из всех методов восстановления коленчатых валов наиболее широкое применение получила автоматическая наплавка под слоем флюса, это объясняется рядом преимуществ по сравнению с другими методами восстановления.

К этим преимуществам можно отнести:

-надежная защита наплавленного шва от окисления;

-небольшие потери на угар и разбрызгивание;

-возможность получения слоя заданного химического состава и свойств;

-возможность автоматизации процесса наплавки.

Существует три основных разновидности наплавки шеек коленчатых валов под флюсом:

- наплавка по винтовой линии;
- наплавка с поперечными колебаниями плавящегося электрода (широкослойная наплавка);
- многоэлектродная.

Наплавка по винтовой линии

При автоматической наплавке под флюсом цилиндрической поверхности шейки коленчатого вала по винтовой линии расплавленный металл формируется в валики с перекрытием. Иногда предварительно производится заплавка галтелей двумя кольцевыми швами с последующим проходом по винтовой линии между ними [13].

Преимущества этого метода сводятся к следующему:

-хорошее качество наплавленного металла;

-возможность легирования и модифицирования наплавленного металла;

-стабильность процесса;

-высокий коэффициент наплавки;

-малое излучающее действие электрической дуги.

К основному недостатку процесса наплавки под слоем флюса можно отнести: неравномерный нагрев основного и наплавленного металла, высокий, быстрый и неравномерный нагрев приводит к большим и неуправляемым деформациям валов и снижению усталостной прочности; образование шлаковой корки и необходимость её удаления; низкий коэффициент перехода легирующих и модифицирующих элементов; высокое содержание легирующих элементов в шлаковой корке (т.е. их потере); трудности удержания сварочной ванны на цилиндрических поверхностях (особенно на деталях из чугуна); необходимость во многих случаях последующих операций упрочнения или

термической обработки наплавленного металла с целью повышения механических свойств изделия [9].

Этот способ получил применение для восстановления в основном стальных коленчатых валов.

Многоэлектродная наплавка под слоем флюса

Этот способ используется при централизованном восстановлении коленчатых валов. При этом способе достигается высокое качество формирования валиков и стабильность процесса. Плоская и гладкая поверхность сварного валика обеспечивает малый припуск на последующую механическую обработку. Схема многоэлектродной наплавки повышает производительность процесса в несколько раз.

Несмотря на многочисленные достоинства, этот способ имеет недостатки, присущие наплавке под слоем флюса, и с более усложненным оборудованием.

Способ получил распространение для централизованного восстановления стальных коленчатых валов.

Широкослойная наплавка под слоем флюса

Способ широкослойной наплавки под керамическим флюсом АНК-18 разработанный в Институте электросварки имени Э.О.Патона АН УССР, позволил существенно повысить производительность самого процесса наплавки, улучшить условия прохождения металлургических процессов в жидкой сварочной ванне.

Сущность способа заключается в следующем. Специальный механизм сообщает мундштуку поперечное движение со скоростью, обеспечивающей плавление сварочной проволоки в общей ванне[14].

Амплитуда колебаний может регулироваться в значительных пределах (от 0 до 120мм) и выбирается по ширине требуемого сварочного шва. В отличие от процесса наплавки по винтовой линии, деталь покрывается слоем металла за один оборот. Укорачивание жидкой сварочной ванны и её быстрая кристаллизация позволяют вести наплавку при большом сварочном токе. Время наплавки шейки одного вала составляет 1,0-1,5мин, что в 4-5раз быстрее, чем при наплавке по винтовой линии (5 минут).

Вместе с тем следует отметить, что металл, полученный при широкослойной наплавке под керамическим или легирующим флюсом, существенно уступает по износостойкости пары трения «вал-вкладыш» таким металлам, как высокопрочный чугун или закаленная сталь 45.

Остановимся более подробно на способах восстановления коленчатых валов под слоем флюса по винтовой линии, как наиболее распространенных.

В настоящее время применяются несколько вариантов технологических процессов восстановления коленчатых валов автоматической наплавки под флюсом.

1. Автоматическая наплавка пружинной проволокой 2кл. под легирующим флюсом АН-348А с примешиванием к нему феррохрома №6 и графита без применения термообработки после наплавки (технология НИИАТ). Этот способ наиболее простой, так как не требуется термическая обработка,

потому что наплавленный металл в процессе охлаждения самозакаливается на мартенситную структуру и твердость HRC 55…57 [12, 13].

Недостатками являются возникновение трещин в наплавленном слое и понижение усталостной прочности валов на 29...38%.

2. Автоматическая наплавка коленчатых валов пружинной проволокой 2кл.,под флюсом АН-348А с применением термообработки высокотемпературного отпуска при 620 ± 20^0С с целью снятия внутренних напряжений и закалку с нагревом ТВЧ (технология КазНИИПИАТ). В результате термической обработки получается износостойкая структура; закаленная часть шеек состоит из мартенсита и тростомартенсита твердостью HRC 52…60, а на незакаленной части у галтелей имеется ферритно–перлитная структура, НВ169...200 [6].Трещин в наплавленном слое меньше, чем при восстановлении валов по технологии НИИАТ. Усталостная прочность примерно равна 90% усталостной прочности новых валов [31, 42].

Недостатком метода является усложнение технологии, а также окисление при термообработке посадочных мест под шестерню, шпонку, подшипник.

3.Автоматическая наплавка коленчатых валов проволокой Нп-30ХГСА под флюсом АН-348А с последующей термической обработкой (нормализация и после механической обработки, закалка ТВЧ-технология Саратовского ПТИ). По данным [9] трещины в наплавленном слое отсутствуют, твердость HRC 45…47 и усталостная прочность такая же, как и при технологии КазНИИПИАТ.

Недостаток – небольшая твердость. Кроме наплавки под слоем флюса для восстановления коленчатых валов ограниченное применение из-за ряда существенных недостатков находила вибродуговая наплавка. К недостаткам относятся поры и трещины в наплавленном слое. Неоднородность структуры и твердости, наличие высоких остаточных напряжений и как результат, снижение усталостной прочности на 40...60% .

Применяется и другие способы восстановления коленчатых валов: плазменная металлизация, вибродуговая наплавка, электролитическое железнение, электроконтактная наплавка открытой дугой, с защищённой дугой, наплавка порошковой проволокой, высокочастотная металлизация, наплавка в среде различных газов, наплавка по металлической оболочке, плазменная наплавка и другие.

Но все они имеют ряд существенных недостатков: сложное оборудование, дефицитные исходные материалы и невысокое качество наплавки. Общим и существенным недостатком всех методов наплавки является значительный нагрев деталей, вследствие чего понижается усталостная прочность и искажается их геометрия. Понижение усталостной прочности объясняется наличием растягивающих напряжений, возникающих при нагреве отдельных участков металла до высоких температур [43] и структурных напряжений, образование которых связано с увеличением объема при переходе аустенита в мартенсит [33].

Искажение геометрии коленчатых валов проявляется в их укорочении до 2,5мм по данным [37] и до 0,3...0,4мм по данным [33] при допустимом

изменении по чертежу до ±0,2мм. В результате вал не укладывается в коренные подшипники блока, а шатуны получают поперечный перекос. Все это вызывает необходимость производить растяжку после полного охлаждения [10, 31] или применять специальные приспособления для ликвидации усадки. Однако, использование статических нагрузок , сопутствующих технологическому процессу наплавки, или динамических нагрузок после наплавки приводит к возникновению растягивающих напряжений, снижающих усталостную прочность [31].

1.3 Особенности процесса восстановления чугунных коленчатых валов и используемые присадочные материалы.

Чугунные коленчатые валы в автомобильных двигателях применяются сравнительно недавно, в связи с использованием их на двигателях автомобилей «Волга» и «Газ-53». Они отливаются из высокопрочных чугунов марок ВЧ 60-2.Изношенные чугунные валы восстанавливают вибродуговой наплавкой в различных средах, автоматической наплавкой под слоем флюса, порошковой проволокой, открытой дугой с использованием самозащитной проволоки марки Св 15-ГСТЮЦА и др [16, 18, 29].

По своим физико-механическим свойствам высокопрочный чугун относится к трудносвариваемым материалам. При наплавке чугуна образуется твердая и хрупкая карбидная зона вокруг сварочного шва и мартенситная сетка непосредственно возле карбидной зоны. Процесс образования карбидов железа усиливается из-за присутствия магния, который увеличивает склонность чугуна к отбелу. Вследствие быстрой диффузии углерода из шаровидных включений графита в аустенитную матрицу, понижается ее температура плавления, и она расплавляется в зонах вокруг шаровидных включений [12, 13].

В условиях сравнительно быстрого охлаждения сварочного шва эта фаза, обогащенная углеродом, застывает как белый чугун, т.е. с образованием цементита. Цементит, как известно, обладает низкой усталостной прочностью. Кроме этого из-за появления значительных собственных напряжений образуются микротрещины в металле шва и околошовной зоне, что связано с малой пластичностью чугуна.

Повышенная жидкотекучесть чугуна и почти мгновенный переход из твердого состояния в жидкое приводит к плохому формированию наплавленных валиков и появлению множества микродефектов (наплавы, флокены), а выделяющиеся газы способствуют появлению раковин и пор, являющихся концентраторами напряжений. Высокая температура наплавки вызывает деформацию чугунного коленчатого вала, исправление которой связано с возможной поломкой вала.

Отмеченные выше недостатки не позволяют получать достаточно хорошие результаты при восстановлении чугунных коленчатых валов известными методами наплавки.

Известны также способы восстановления одно-и-двухслойной наплавкой валов под слоем флюса, разработанные в НИИАТе и

КазНИПИАТе. Для однослойной наплавки применяли проволоку разных марок, пружинную 2 класса, ОВС, Нп- 30ХГСА, Св-08, Св-10Х13, Св-12ГС и др. С использованием флюсов АН-348А, ОСЦ-45, АН-15, АН-20 с добавками, без добавок, в виде графита, феррохрома, ферромарганца, ферромолибдена, алюминия и других компонентов для получения наплавленного металла мартенситной структуры с твердостью HRC 56...62 без пор и трещин [44, 45, 46].

Усталостная прочность коленчатых валов двигателей ГАЗ-21А, восстановленных двухслойной наплавкой под легирующим флюсом, снижается на 26…28% , т.е. меньше, чем при вибродуговой наплавке в жидкости.

Двухслойная наплавка порошковой проволокой, разработанная в КазНИИПИАТе, также снижает усталостную прочность на 45...50% [14, 47, 48].

Наплавка в среде углекислого газа проволоками Нп-2Х13, ОВС, Св-12ГС, Нп-30ХГСА, Св-08 также снижает усталостную прочность на 45...50%, при этом наблюдаются поры и трещины [14, 47, 48].

Лучшие результаты получены при наплавке высокопрочного чугуна под защитной металлической оболочкой. При этом способе шейку обвертывают металлической оболочкой из листовой стали, плотно прижимают оболочку к поверхности детали с помощью специального приспособления и сваркой в среде углекислого газа прихватывает ее в стыке. После удаления приспособления производят автоматическую наплавку детали под флюсом по металлической оболочке непосредственно.

Известно, что для устранения трещин в наплавленном металле необходимо уменьшить в нем содержание углерода, кремния, марганца, серы и фосфора. Поскольку высокопрочный чугун содержит значительное количество этих элементов, применяли оболочку из стали 08 и проволоку Св-08. Лучшее формирование наплавленного слоя и меньшее количество дефектов получилось при использовании флюса АН-348А. Оптимальная толщина металлической оболочки составила 0,8 мм. При оптимальном составе легирующего флюса твердость наплавленного металла с мартенситной структурой составила HRC 56…62, а по износостойкости не уступала новым, при снижении усталостной прочности до 10...15%.

В последние годы в ремонтном производстве получили распространение способы восстановления коленчатых валов с использованием проволоки ЭП- 439 (15 ГСТЮЦА). Достоинство это способа заключается в том, что используется только проволока ЭП-439 с подачей сжатого воздуха. Однако, при этом способе образуются поры, чаще трещины, что значительно влияет на усталостную прочность коленчатых валов. Лучшее формирование наплавленного металла наблюдается при широкослойной наплавке проволокой Св-08 с добавкой в дугу ферромагнитного порошка содержащего редкоземельные металлы, стабилизирующие горение дуги.

Для наплавки деталей разработана технология, изготовлено и внедрено специальное оборудование и приспособления. Основным преимуществом этого способа восстановления коленчатых валов –

является создание наплавленного металла, по своему составу близкого к высокопрочному чугуну марки ВЧ-60-2 и имеющего высокие износостойкие качества и физико-механические характеристики при минимальном количестве трещин, пор и других дефектов.

Более качественный металл наплавки получен с использованием простой сварочной проволоки Св-08А и специальной порошковой шихты следующего состава [12]:

-графит серебристый (ГОСТ5229-74) - 12...13%;

-порошок алюминиевый АП-4 (ГОСТ 10086-62) - 6...8%;

-ферробор порошковой (ГОСТ14848-09) - 0,05...0,1%;

-порошок фтористого кальция (ГОСТ 7167-68) -- 2...5%;

-порошок железный ПЖ-5М (ГОСТ 9849-74) – остальное.

Однако при всех достоинствах этого способа, входящие в шихту компоненты, в особенности комплексный модификатор очень дорог и сложен по составу (12 компонентов).

Сравнительные технико-экономические показатели основных способов восстановления коленчатых валов получивших применение в настоящее время на практике приведены в таблице 1.4.

Проведенный анализ способов восстановления позволяет сделать следующие выводы:

- практически при всех способах восстановления чугунных коленчатых валов наблюдается появление пор и трещин;

- ни один из способов восстановления не позволяет получить усталостную прочность валов на уровне новых.

- наименьшее снижение усталостной прочности наблюдается при наплавке валов по оболочке проволокой ЭП-439. Но недостатком этого метода является технологическая сложность;

- лучшее формирование наплавленного слоя получено при наплавке проволокой Св-08 с добавками в дугу ферромагнитной шихты.

Для более полного объяснения процесса особенностей наплавки деталей из чугуна необходимо напомнить о строении и кристаллизации чугунов. Металлы и их сплавы в твердом виде, как известно, представляют собой кристаллические тела, состоящие из плотно прилегающих зёрен.

Кристаллы образуются в момент перехода металла из жидкого состояния в твердое. Рост кристаллов происходит с определенной скоростью зависящей от скорости охлаждения. Кристаллы имеют различную форму, соединяясь между собой они приобретают вид зёрен, имеющих неправильные формы. Величина зёрен зависит прежде всего от скорости охлаждения. При быстром охлаждении зерна получаются мелкозернистыми, при медленном - более крупных размеров. Мелкозернистые структуры металлов имеют лучшие механические свойства нежели крупнозернистые.

Большое значение в составе чугунов имеет графит, его форма. Шаровидная форма структурно свободного графита в чугунах обусловливает хорошие механические свойства, сравнительно низкий коэффициент трения благодаря смазывающему действию графита, высокую

циклическую вязкость за счет гашения вибрации и резонансных колебаний; высокую ударную вязкость по сравнению с чугунами , имеющими пластинчатую форму графита.

Наибольшее влияния на форму графитовых включений оказывает модифицирование чугуна. По характеру воздействия на процесс кристаллизации модификаторы делятся:

- образующие дополнительные центры кристаллизации;
- поверхностно – активные вещества.

К модификатором первого типа относятся ферросилиций, силикокальций и алюминий. Эти вещества, введенные в чугун, образуют с углеродом, азотом и кислородом такие соединения, которое служат центрами кристаллизации графита, что приводит к измельчению графитных включений и повышению прочности чугуна. Высокопрочный чугун с шаровидным графитом получают также путём модифицирования. В этом случае обычно вводят небольшое (до 0,6%) количество магния.

Магний является поверхностно активным веществом, отлагаясь на поверхности растущих кристаллов графита, он способствует равномерному росту во всех направлениях. В результате этого графит приобретает шаровидную форму.

Аналогично модифицированию в производстве чугуна, при наплавке использование комплексных модификаторов привело к созданию способа наплавки обеспечивающего на наплавленной поверхности синтетических чугунов, отличающихся высокими механическими свойствами.

Применение комплексных модификаторов в виде порошковых смесей с редкоземельными металлами значительно влияет на свойства наплавленного металла, прежде всего, измельчая зерна шаровидного графита и металлической основы [11, 37].

Наилучшие показатели физико-механических свойств коленчатых валов выявлены при наплавке проволокой Св-08АА с введением в дугу магнитной порошковой шихты сложного состава:

-графит серебристый 12…13%;
-порошок алюминиевый АП-4 6…8%;
-комплексный модификатор 15…16% .
-ферробор порошковой 0,1%;
-порошок фтористого кальция 2…5%;
-порошок железный ПЖ-5М остальное.

Таблица 1.4 - Технико-экономические показатели различных способов восстановления

№	Исследуемые способы восстановления	Технико-экономическое покозателей различных способов восстановления										
		Разработчики	Твёрдость-HRC	Скорость наплавки, м/мин	Прочность, мн/м^2		Время наплавки, мин	Расход флюса, кг	Расход электродн.пров., кг	Среда, подаваемой в зону наплавки	Расход эл.энергии, квт-ч	Стоим. наплавки, 1п.м, тг
1	Вибродуговая наплавка в кислороде	ТИИИМСХ	40...48	0,41	39,42	0,69	33	1,31	-	Кислород, 99л	3,14	0,340
2	Электродуговая наплавка по оболочке под флюсом	НИИАТ	55...70	0,42	35,905	0,63	67	1,68...1,05	2...2,3	Углекислый газ,600л листовая сталь 0,6кг.	5,82	0,995
3	Электродуговая наплавка проволокой ЭП-439	НИИАТ	55...60	данных нет	39,158	0,69	49	2,4	2,9...3,4		7,84	1,05
4	Электродуговая наплавка Проволокой ЭП-439	НИИАТ	55...60	1,3...2,5	46,43	0,82	53	1,35		Сжатый воздух 6360л.	4,37	0,925
5	Широкослойная электродуговая наплавка	НИИАТ	30...42	1,4...1,5	24,116	0,42	12	0,94	Ферромагнитный порошок 0,96кг.		2,10	0,651

Отклонение весовых пропорций порошковых составляющих от рекомендованных интервалов значительно влияет на свойства наплавляемого металла и процесс наплавки . Например, использование порошка алюминия в шихте глубоко дегазирует наплавленный металл, устраняет поры, позволяет вести наплавку с большим смещением электрода от защиты за счет образования на поверхности жидкой сварочной ванны тугоплавкой окисной пленки, которая препятствует стеканию металла с наплавляемой поверхности. Наличие графита способствует науглероживанию металла, а также улучшает процесс переноса металла электрода на наплавляемую поверхность.

Введение кальция обеспечивает получение в наплавленном металле структурно – свободного графита. Кальций имеет высокую температуру кипения, что позволяет получать синтетический чугун без защитных устройств и без загрязнения атмосферы помещения. Содержание кремния в шихте обеспечивает раскисление металла наплавки и уменьшает порообразование.

Добавка модификатора, содержащего редкоземельные элементы, способствует образованию мелкозернистой структуры металла, в наплавленном слое снижает вредное действие примесей фосфора и серы, обеспечивает защиту сварочной дуги, а также способствует образованию шаровидного графита. Фтористый кальций вводится в шихту в небольшом количестве для улучшения усвоения комплексного модификатора.

Названные составные элементы порошковой шихты позволяют получить в наплавленном слое синтетический чугун со структурно свободным графитом и дают соответствующий эффект в виде высоких физико-механических свойств наплавленного металла и коленчатого вала в целом.

Однако видно и то, что порошковая шихта очень сложна и естественно дорого стоит. В то же время использование в последние годы проволоки ЭП-439, 15ГЮСТЦА показывает в целом хорошие результаты по формированию сварочного шва. Недостатки - наличие пор и трещинообразование вдоль и между наплавляемыми валиками. Составляющие проволоки обеспечивают требуемые механические свойства, за исключением твердости.

Исходя из этих недостатков и учитывая свойства и влияние отдельных составляющих шихты предлагаемой НИЛАТ, мы в своих исследованиях предлагаем следующие варианты для экспериментов. За базовый вариант принимаем технологию ГОСНИТИ, т.е. использование электродной проволоки 15 ГЮСТЦА (ЭП-439) с охлаждением сварочного шва сжатым воздухом. Наплавка производится по винтовой линии [48].

Недостатки этой технологии (трещины между валиками, поры, а также пониженную твердость) предполагаем устранить путем введения в дугу ферромагнитной шихты (2 варианта) и использование поперечных колебаний электрода (широкослойной наплавки) [48].

Таким образом, предлагается три варианта наплавки:

- широкослойная наплавка проволокой 15 ГЮСТЦА (ЭП-439) с введением в дугу ферромагнитной шихты сложного состава (графит серебристый ГЛ-2; алюминий порошковой АП-4; железный порошок ПЖ-5М);

- винтовая наплавка проволокой 15 ГЮСТЦА (ЭП-439) с обдувом наплавленного валика сжатым воздухом (0,2...0,3 МПа, базовый вариант);

- широкослойная наплавка проволокой 15 ГЮСТЦА (ЭП-439) с введением в дугу порошкового сормаита.

Электродная проволока 15 ГЮСТЦА имеет в своем составе до 1% марганца, алюминии, кремния, титана, что уже обеспечивает стабильное горение дуги, хорошие формирование шва и нашей задачей является повышение механических свойств восстанавливаемой детали – коленчатого вала, с учетом выполняемых им функций и получаемых нагрузок. С этой целью нами введены в шихту алюминий, которой как уже отмечалось, устраняет поры, трещинообразование. Введение графита повышает твердость наплавки, а наличие до 5%, в железном порошке молибдена должно способствовать получению мелкозернистой структуры. Весовое соотношение компонентов шихты для исходной композиции принимались с ориентированием на литературные источники и уточнялись экспериментально.

В третьем варианте в качестве шихты использовался без каких-либо добавок порошковый сормаит - известный износостойкий материал для наплавки, но в сочетании с проволокой 15 ГЮСТЦА применяемый впервые.

Таким образом, основными условиями для получения высоких физико-механических свойств восстановленного коленчатого вала являются: получение в структуре наплавки мелко и среднеигольчатого мартенсита, обеспечивающего высокую износостойкость изделия, а также наименее напряженную структуру, что немаловажно, в особенности при восстановлении чугунного коленчатого вала. Получение мартенситной структуры возможно, как известно, при нагреве изделия свыше точки A_3 (720 ˚С) и быстром её охлаждении [49].

При подвижных источниках тепла, как в нашем случае, когда дуга горит непрерывно и перемещается с постоянной скоростью, момент теплового равновесия наступает, когда количество тепла, вводимого в тело дугой, становится равным количеству отведенного тепла. После достижения равновесия подвижное тепловое поле сохраняет свой характер. Такое тепловое состояние называется предельным, или квазистационарным. Такое предельное состояние наступает не сразу.

Например, при дуговой сварке и наплавке в начальный момент тепло дуги вводится в холодный металл, температура которого постоянна во всем объеме. По мере горения дуги металл нагревается; при этом зона нагретого металла, прилегающего к месту ввода тепла источникам, увеличивается. Когда при данном режиме нагрева зона металла, нагретая выше какой-либо температуры Т, перестает увеличиваться, то можно считать что для этой зоны наступает предельное состояние. Ясно, что в зонах вблизи источника тепла, т.е. нагретых до более высоких температур, предельное состояние наступает раньше, чем в более отдалённых зонах [50, 51].

Период процесса распространения тепла до достижения предельного состояния есть период теплонасыщения. В этом периоде температура Т *(t)* любой точки тела, отнесенной к координатной системе и связанной с

источником тепла, возрастает от T (O) = O до температуры предельного состояния T (∞) = $T_{пр}$, теоретически достигаемой при $t \to \infty$.

Температура T (t) в точке с координатами (x, y, z) в период теплонасыщения при точечном источнике тепла на полубесконечном теле (коленчатый вал), определяется по формуле:

$$T(t) = \psi(t)\, T_{пр}, \qquad (1.1)$$

где ψ - коэффициент теплонасыщения $0 \le \psi \ge 1$. Возрастание этого коэффициента во времени характеризует процесс насыщения данной точки тела теплом.

Величина коэффициента $\psi(t)$ зависит не только от времени, но и от расстояния в рассматриваемой точки от источника тепла $\psi = f(R,t)$.

Ниже приведён пример расчет температур в период теплонасыщения для точки с заданными координатами (x, y, z) [50, 51] .

Исходные данные:

шатунная шейка с d=60мм и параметрами: коэффициентом теплопроводности;

$$\lambda = 0{,}1 \frac{кал}{см \cdot с°C};$$

с коэффициентом температуропроводности $a = 0{,}1 \frac{см^2}{с}$;

при наплавке скорость подвода тепла - $q = 2000 \frac{кал}{с}$;

скорость перемещения источника тепла - $V = 0{,}2 \frac{см}{с}$.

Температура предельного состояния для этого случая

$$T(R,t) = \frac{3180}{R} e^{-(x+R)}; \qquad (1.2)$$

расстояние R до рассматриваемой точки в различные моменты времени

$$R = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{x^2 + 1}, \text{ при } y=1. \qquad (1.3)$$

Безразмерные критерии расстояния и времени:

$$\rho = \frac{v}{2a} R = \frac{0{,}2}{2 \cdot 0{,}1} R = R; \quad \tau = \frac{v^2}{4a} t = \frac{0{,}2^2}{4 \cdot 0{,}1} t = 0{,}1t. \qquad (1.4)$$

Время, прошедшее от начала наплавки,

$$t = \frac{L}{v} = \frac{x}{v}. \qquad (1.5)$$

Результаты расчета температур в период теплонасыщения в рассматриваемой точке за период времени, характеризуемый абсциссами от x=1см до x=-4см приведены в таблице 1.5. и рисунок 1.3.

Таблица 1.5 - Пример результатов расчета температур в период теплонасыщения [50]

x, см	xx^2, $см^2$	R, см	(x+R), см	$e^{-(x+R)}$	$\frac{1380}{R}$	$T_{пр}$, ^0C	t, с		ρ	ψ	T', ^0C
1,0	11,0	11,41	2,41	0,09	11310	118	0	0	1,41	0	0
0,5	0,25	1,12	1,62	0,196	2850	60	2,5	0,25	1,12	0,2	118
0	0	1,0	1,0	0,368	3180	170	5,0	0,5	1,0	0,68	795
-0,5	0,25	1,12	0,62	0,538	2850	530	7,5	0,75	1,12	0,76	1160
-1,0	1,0	1,41	0,41	0,664	2250	495	10,0	1,0	1,41	0,77	1150
-2,0	4,0	2,23	0,23	0,803	1140	160	15,0	1,5	2,23	0,77	890
-4,0	16,0	4,1	0,1	0,905	776	00	25,0	2,5	4,1	0,65	525

Из расчетов и таблицы видно, что 2-3 сек. на длине 2-3 см металл находится при температуре 720^0C, достаточной для образования мартенситных структур. Известно [49, 50], что при наплавке на массивное полубесконечное пространство, каковым является коленчатый вал, скорость охлаждения составляет более 110 $\frac{°C}{c}$.

Также известно, что для образования мартенситных структур достаточно скорости нагрева 80-90 $\frac{°C}{c}$. Таким образом , при широкослойной наплавке возможно получение мартенситных структур, которые являются наименее напряженными и наиболее износостойкими. И, если введение в дугу графита, позволит получить в поверхностном слое шаровидный графит, повышение износостойкости будет очевидным.

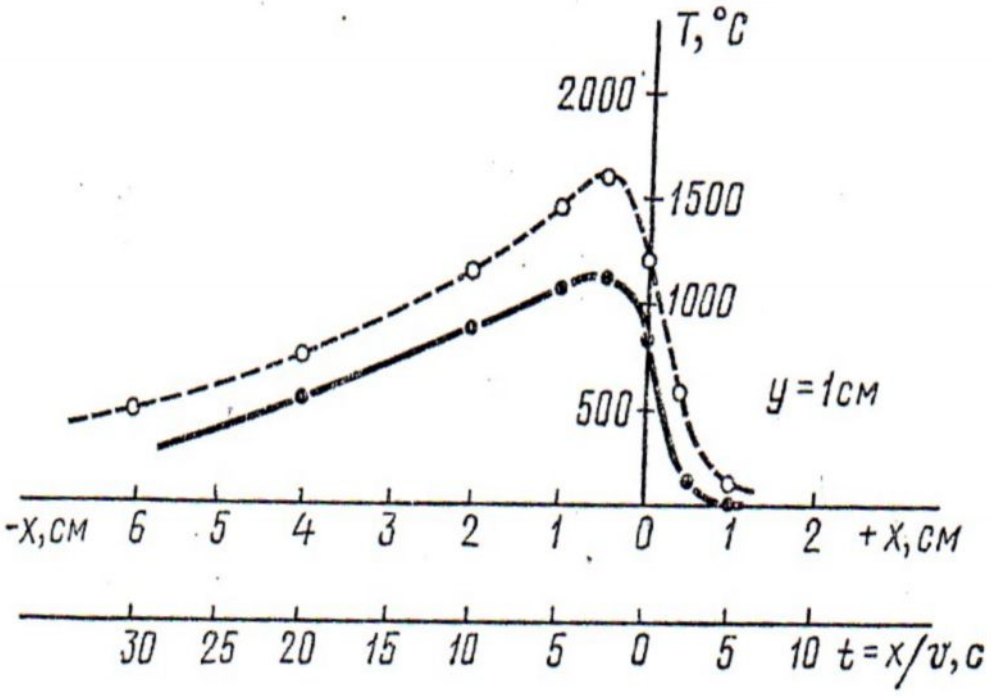


Рисунок 1.3 – Изменение температур в период теплонасыщения, в рассматриваемой точке наплавляемого слоя [50].

Размеры ванны расплавленного металла определяются расчётом изометрической поверхности $T=T_{пл}$ предельного состояния. При наплавке узкого валика на поверхность массивного изделия температура T (0,t), вычисленная по уравнению (1.1) для точек r = 0, расположенных на оси валика [52],

$$T(0,t) = \frac{q}{2\pi\lambda\upsilon t} \; ; \qquad (1.6)$$

обратно пропорциональна времени t, прошедшему после пересечения дугой рассматриваемой точки.

Промежуток времени t_B, по истечении которого температура точки В станет равной температуре плавления, т.е. $T_B=T_{пл}$ определяется из уравнения (1.6), положив $T(0,t)= T_{пл}$ и $t=t_B$, получим

$$t_B = \frac{q}{2\pi\lambda\upsilon T_{пл}} \; . \qquad (1.7)$$

Теоретическая длительность пребывания t_B в жидком состоянии частиц металла расположенных на оси перемещения дуги при наплавке узкого валика на массивное неограниченное по толщине изделие, пропорциональна погонной энергии дуги q/υ

$$t_B = P_1 \frac{q}{\upsilon}, \text{ где } P_1 = \frac{1}{2\pi\lambda T_{пл}} = const \ . \qquad (1.8)$$

Чем больше дуга вводит тепла на единицу длины шва, тем дольше металл ванны находится в расплавленном состоянии. Длительность пребывания t_B металла на оси шва в расплавленном состоянии связана с длиной ванны L выражением

$$t_B = \frac{L}{\upsilon}, \qquad (1.9)$$

где υ – скорость сварки. Чем длиннее ванна, тем дольше находится металл в расплавленном состоянии при прочих равных условиях. Однако время нахождения различных частиц металла ванны в расплавленном состоянии неодинаково. Металл, находящийся у краёв ванны, затвердевает раньше, чем металл на оси шва.

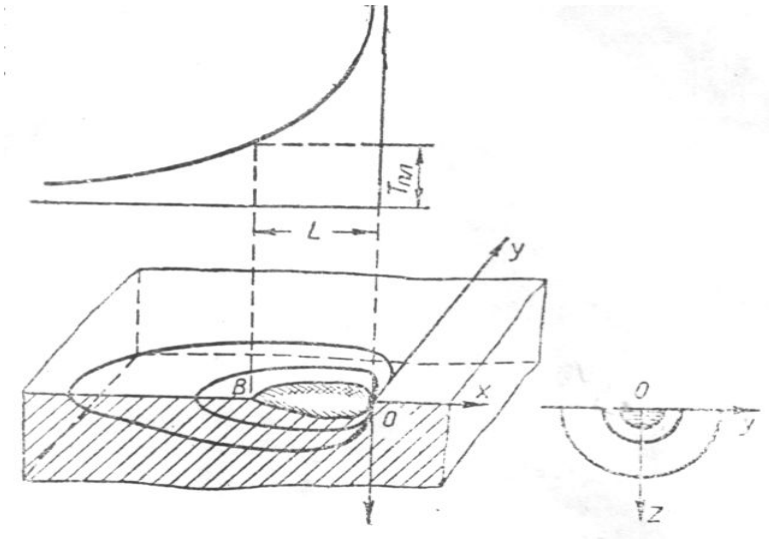


Рисунок 1.4 – Схема определения длины ванны при наплавке валика на массивное изделие движущейся дугой.

Длина ванны L при наплавке узкого валика на массивное изделие

$$L = t_B \upsilon = \frac{q}{2\pi\lambda T_{пл}} . \qquad (1.10)$$

пропорциональна мощности дуги, обратно пропорциональна коэффициенту теплопроводности и температуре плавления метала изделия (λ и $T_{пл}$ величины постоянные для данного металла), и не зависит от скорости перемещения дуги.

Эффективная тепловая мощность дуги q пропорциональна её электрической мощности UI. Поэтому длину ванны можно выразить соотношением:

$$L = \rho_2 UI, \qquad (1.11)$$

где ρ_2 – постоянный коэффициент, определяемый из опытов.

Отступления при расчёте от действительных условий наплавки приводят к тому, что очертания ванны и зоны проплавления не соответствуют очертанию изотермы $T = T_{пл}$, теоретически рассчитанной по схеме сосредоточенного источника в твёрдом теле. На больших расстояниях от дуги вследствие выравнивающего влияния процесса теплопроводности поперечные колебания дуги и её погружение в глубь ванны мало сказываются на очертаниях изотерм $T < T_{пл}$. При расчёте размеров сварочной ванны и зоны проплавления необходимо считаться с этими особенностями процесса.

Расчёт позволяет оценить длину ванны. Для расчёта ширины и глубины зоны проплавления пока нет достаточных данных о распределении тепла дуги и об углублении дуги в ванну. Легче оценить теоретически площадь зоны проплавления, на которой меньше, чем на ширине и на глубине, сказываются отступления расчётной схемы от действительного явления.

Нагрев и расплавление электрода. При наплавке металлическим электродом производительность наплавки тесно связана с производительностью расплавления $C_р$, под которой понимают вес электродного металла, расплавляемого дугой в единицу времени. Она может быть выражена из известного энергетического соотношения [53]:

$$q_Э = C_р (S_к - S_\tau) + G_{рп} S_{кп}, \qquad (1.12)$$

где $q_Э$ – тепло дуги, введенное в электрод, в кал/сек;

$S_к$ - теплосодержание капель электродного металла а кал/м;

S_τ – теплосодержание электрода, нагретого током, в кал/м;

$S_{кп}$ – теплосодержания расплавленного покрытия, в кал/м;

$G_{рп}$ – вес покрытия, расплавляемого дугой, в г/сек.

В процессе сварки $q_Э$, $G_{рп}$, и $S_{кп}$ остаются постоянными, разность $S_к - S_\tau$ уменьшается, так как в результате теплового действия тока электрод нагревается и возрастает S_τ. Следовательно, при нагреве электрода током $C_р$ будет увеличиваться. Но чрезмерный нагрев электрода током не допускается, так как он приводит к разложению и окислению некоторых компонентов покрытия, к резкой неравномерной скорости плавления электрода по длине, что нарушает равномерность процесса наплавки. При этом изменяется характер отложения шлака, ухудшается внешний вид шва и становится возможным непровар. Поэтому при определении производительности процесса расплавления обычно исключается влияние подогрева электрода током чрезмерно большой плотности. Для этого сварку ведут на максимально допустимых плотностях тока, при которых температура нагрева электрода током к концу его плавления не превышает 500-600ºС. В этом случае можно

считать, что в процессе наплавки $S_к$ $–S_τ$ остаётся постоянной, и тогда производительность расплавления будет пропорциональна сварочному току, т.е

$$C_р = \alpha_ρ I, \qquad (1.13)$$

где $\alpha_ρ$ - коэффициент плавления, чаще всего имеет размерность г/а·ч;

$\alpha_ρ$ зависит от величины, рода и полярности сварочного тока, материала электрода и покрытия и колеблется от 8 до 30 г/а·ч.

Производительность наплавки. При дуговой сварке образуется большое количество мелких капель, вылетающих за пределы дуги. Причиной этому являются газообразование и газовыделение в расплавленном металле. Помимо капель и брызг, некоторое количество электродного металла распыляется, конденсируется и затем окисляется. По этой причине не весь расплавленный металл электрода полезно переносить на изделие. Часть его теряется на разбрызгивание, испарение и угар. Потери электродного металла могут быть подсчитаны по формуле:

$$\psi = \frac{G_p - G_н}{G_p} \ . \qquad (1.14)$$

Здесь $C_р = \alpha_ρ \cdot I$ и $G_н = \alpha_н \cdot I$ представляют собой соответственно веса расплавленного и наплавленного металла в единицу времени. Входящий в формулу $G_н = \alpha_н \cdot I$ коэффициент пропорциональности называется коэффициентом наплавки. Он имеет ту же размерность, что и коэффициент $\alpha_ρ$, меньше последнего на величину потерь и уменьшается с увеличением сварочного тока. Потери на угар и разбрызгивание в среднем составляют 10-20% электродного стержня.

Выводы по главе:

Приведены краткие сведения о коленчатых валах автотракторных двигателей, изготовленных из стали и высокопрочного чугуна. При этом отмечены виды термической обработки, которым они подвергаются для получения твёрдости рабочих поверхностей шеек валов, для снижения износа. Перечислены материалы подшипников скольжения (вкладышей), в паре с которыми они работают и описаны условия работы коленчатых валов, при которых в них возникают напряжения, превышающие пределы усталостной прочности, приводящие к поломкам валов.

На основании описанных условий работы коленчатых валов, делается вывод о том, что износ и усталость являются лимитирующими факторами, определяющими служебную долговечность валов и их выносливость.

Рассмотрены существующие методы восстановления коленчатых валов и технологии наплавки шеек валов, предложенных разными исследовательскими организациями, отмечены особенности и способы восстановления чугунных коленчатых валов и используемые для этого присадочные материалы.

Приведённый анализ способов восстановления чугунных коленчатых валов автотракторных двигателей и технико-экономическое их сравнение позволяют сделать следующие выводы:

- практически при всех способах восстановления чугунных коленчатых валов наблюдается появление дефектов наплавки в виде пор и трещин;
- ни один из способов восстановления не позволяет получить усталостную прочность валов на уровне новых;
- лучшее формирование наплавленного слоя получено при наплавке шеек валов проволокой 15-ГСТЮЦА с введением в зону расплава ферромагнитной шихты в виде порошка.

Глава II Теоретические основы определения физико-механических свойств наплавленных чугунных коленчатых валов и разработка методик их испытаний.

2.1 Обоснование и выбор способа восстановления чугунных коленчатых валов.

Широкое применение чугунных деталей в конструкциях тракторов, автомобилей и их выход из строя при эксплуатации требуют последующего восстановления. Восстановление изношенных чугунных деталей из-за особенности строения и физико-механических свойств чугуна вызывает значительные трудности [12, 13, 14, 48].

Быстрое охлаждение расплавленного металла в зоне наплавки, а также выгорание кремния способствуют отбеливании чугуна, что затрудняет его обработку режущем инструментом. Вследствие низкой пластичности чугуна при неравномерном нагреве и охлаждении могут образоваться трещины, как в самом шве, так и в околошовной зоне.

Наплавку на чугунные детали можно выполнять с предварительным, сопутствующим и последующим подогревом, а также в холодном состоянии. Подогрев необходим с целью уменьшения скорости охлаждения металла и создания условий для протекания процесса графитизации. Поэтому наибольшее распространение получила наплавка с частичным подогревом (до 250-400 ºС) и без предварительного подогрева изделия.

На получение качественного соединения при наплавке на неподгретые чугунные детали оказывают значительное влияние технологические и металлургические факторы. К технологическим относятся сила тока, напряжение дуги, скорость наплавки. К металлургическим – графитизация, удаление углерода, карбидообразование. Качество наплавленных слоев на чугунные детали зависит главным образом от технологии наплавки и применяемых сварочных материалов.

Анализом литературных источников, наблюдениями, проведёнными на ремонтных предприятиях АРО-1, АРО-2, Тургенском РМЗ, изучением ремонтного фонда установлено, что при наплавке по винтовой линии

происходит поломка валов из-за трещин. Это послужило основанием для принятия первого решения - наплавку проводить колеблющимся в поперечном направлении электродом, т.е. широкослойной наплавкой [26].

Исследование твёрдости наплавленных валов, выполненных на Тургенском РМЗ, АРО-2, наблюдения по ремонтному фонду показали низкую твёрдость наплавок при использовании проволоки 15-ГЮСТЦА. С целью увеличения твёрдости наплавок, а также возможного уменьшения количества пор и трещин было принято решение вводить в электрическую дугу порошковые добавки [30, 48, 53, 54].

В качестве порошковых добавок использовали два варианта.

Первый – графит серебристый ГОСТ 5279-74, порошок алюминиевый АП-4 (ГОСТ 100096-62), порошок железный ПЖ-4М (ГОСТ 9849-74).

Второй – сормаит порошковый, с небольшими добавками алюминиевого порошка.

В итоге для исследования были приняты три варианта проведения наплавки валов:

- широкослойная наплавка проволокой 15-ГЮСТЦА с введением в дугу порошковой смеси в составе: графит серебристый, порошок алюминиевый, порошок железный ПЖ-4М;

- широкослойная наплавка проволокой 15-ГЮСТЦА с введением в дугу сормаита порошкового с добавкой алюминиевого порошка;

- наплавка по винтовой линии проволокой 15-ГЮСТЦА в потоке воздуха.

Коленчатый вал - тяжело нагруженная деталь, работающая в условиях циклических, знакопеременных нагрузок. Условия работы детали предопределяют проведение тех или иных исследований по выявлению значений основных параметров, определяющих ресурс изделия [38, 55, 56].

Коленчатые валы, восстановленные наплавкой, должны обладать достаточной износостойкостью и усталостной прочностью. При выборе оптимальных режимов наплавки по качеству нанесённого покрытия используют определяющие признаки – наличие или отсутствие дефектов.

Согласно классификации изделий по качеству и видам дефектов, ГОСТ 17102-71 даёт более двадцати терминов дефектов. Международный институт сварки классифицирует дефекты по следующим видам: трещины, раковины, поры, твёрдые включения, несплавления и непровары, несоответствие форме сварного соединения [57, 58].

Для выбора оптимальных режимов наплавки желательны методы контроля, позволяющие производить количественное определение величины дефекта. Но при исследованиях, проводимых в нашем случае, допустимо и достаточно качественное выявление дефектов, а именно визуальный осмотр с целью выявления двух основных дефектов-трещин и пор. Из количественных применялся метод определения твёрдости твердомером ТК-2, по шкале «С».

При винтовой наплавке, с целью максимального приближения к практике восстановления, ориентировались на режимы, применяемые на АРО-2, Тургенском РМЗ, и, рекомендуемых литературными источниками:

- напряжение на дуге, В (26…28);

- сила тока, А (180…200);
- вылет электрода, мм (15…20);
- смещение электрода с зенита, мм (8…10);
- материал электрода, (15 ГЮСТЦА);
- диаметр электрода, мм (1,6);
- скорость подачи электрода, м/ч (113);
- частота вращения детали, об/мин (1,5);
- источник питания ВС-600М;
- род тока – постоянный, обратной полярности;
- расход воздуха, л/час 7870.

Варьирование режимов наплавки проводилось методом планирования классического эксперимента. При этом учитывались изменения качественных показателей, влияющих на твёрдость и дефектность наплавленного слоя:

- с увеличением скорости более 80 м/ч – нарушается стабильность процесса наплавки, увеличивается дефектность;
- с увеличением шага наплавки более 5,0 мм/об – уменьшается твёрдость, возрастает дефектность;
- с уменьшением скорости присадочной проволоки менее 30 м/ч - уменьшается твёрдость и увеличивается дефектность;
- с увеличением шага наплавки менее 3 мм/об – снижается производительность, твёрдость и увеличивается тепловыделение в основной металл;
- с увеличением расхода воздуха более 8000 л/час – увеличивается расход присадочного материала, уменьшается толщина наплавляемого металла;
- с уменьшением расхода воздуха менее 6000 л/час – снижается твёрдость, увеличивается дефектность.

При широкослойной наплавке использовались, как рекомендации [59], так и практика наплавки на ремонтных предприятиях. Основные режимы наплавки были следующие:

- напряжение на дуге, В (20…22);
- сила тока, А (180…200);
- скорость подачи проволоки, м/мин (2);
- число колебаний мундштука, ед/мин (40);
- расход порошка, г/мин (36);
- число оборотов детали, об/мин (1,5);
- диаметр проволоки, мм (1,6);
- марка проволоки 15 ГЮСТЦА;
- ток постоянный, обратной полярности;
- источник питания ВС-600М.

Пределы варьирования режимов наплавки определялись аналогично наплавке по винтовой линии, классическим методом, когда при всех неизменных параметрах изменялся какой-либо один.

Далее проводились исследования физико-механических свойств наплавленного слоя шеек чугунных коленчатых валов.

На данном этапе работ из физико-механических свойств наплавленных шеек коленчатых валов измерялись твёрдость, микротвёрдость образцов, микро и макроструктура поперечного разреза шеек коленчатого вала [33]. Для исследования были представлены образцы, вырезанные из коренных и шатунных шеек коленчатых валов, восстановленных наплавкой. Образцы вырезались с таким расчётом, чтобы поперечное сечение составляло 550…600 мм^2.

Образцы имели следующую маркировку.

Образец «1». Коренная шейка, присадочный материал проволока 15 ГСТЮЦА, порошок сложного состава (углерод порошковый АЛ-4; железный порошок с молибденом ПЖ-4М).

Образец «2». Шатунная шейка, присадочный материал проволока 15 ГСТЮЦА + порошок сложного состава.

Образец «3». Шатунная шейка, присадочный материал проволока 15 ГСТЮЦА, винтовая наплавка.

Образец «4». Коренная шейка, присадочный материал проволока 15 ГСТЮЦА, винтовая наплавка.

Образец «5». Шатунная шейка, присадочный материал проволока 15 ГСТЮЦА, порошок «Сормаит».

Образец «6». Коренная шейка, присадочный материал проволока 15 ГСТЮЦА, порошок «Сормаит».

Для выявления микроструктуры металла, поверхности образцов протравлялись в реактиве следующего состава: этилового спирта -100 мл и азотной кислоты (концентрированной) – 4мл.

Исследования микроструктуры металла образцов проводились на горизонтальном металлографическом микроскопе МИМ-8М. При увеличении х100 определялась величина действительного зерна в соответствии с требованиями ГОСТ 5639-82. При увеличении х300 и х500 определялись основные составляющие и характер микроструктуры.

Измерение микротвёрдости наплавленного металла и основного металла в околошовной зоне и зоне термического влияния проводилось на приборе ПМТ-3 алмазной пирамидой при нагрузке 100 гс. Измерение микротвёрдости производилось через каждые 100 мкм или 0,1 мм.

2.2. Теоретические основы износа в парах трения коленчатых валов.

Под изнашиванием подразумевается процесс разрушения и отделения материала с поверхности твёрдого тела и (или) накопления его остаточной деформации при трении, проявляющегося в постепенном измерении размеров и (или) формы тела. Износ является результатом изнашивания, определяемого в установленных единицах. В соответствии с ГОСТ 23.002-78 различают свыше десяти видов изнашивания.

Наиболее распространённое изнашивание при механическом взаимодействии поверхностей. Оно подразделяется на абразивное

изнашивание, за счёт схватывания, усталостных явлений, коррозионно-механических воздействий, электрических и др. абразивное изнашивание во многих механизмах является ведущим.

Этим же стандартом (ГОСТ 23.002-78) устанавливаются некоторые определения характеристик износа. К ним относятся:

а) предельный износ – износ, соответствующий предельному состоянию;

б) допустимый износ – износ, при котором изделие сохраняет работоспособность;

в) местный износ – износ на отдельном участке;

г) эпюра износа – графическое изображение распределения местного износа по поверхности трения или по определённому её сечению.

Как правило, в процессе трения одновременно наблюдается несколько видов изнашивания. Тем не менее, в большинстве случаев проявляется ведущий вид изнашивания, ответственный за характер и размер износа.

В процессе изнашивания образуются единичные разрушения в малом объёме материала, который удаляется из зоны трения в виде частиц износа. Различают износ при трении без смазки, при граничной смазке и абразивное **изнашивание.**

По характеру деформирования износ протекает при упругом контакте, пластическом и в условиях микрорезания.

Количественной относительной характеристикой износа является интенсивность изнашивания, которая определяется как отношение значения износа к обусловленному пути, на котором происходило изнашивание или объёму выполненной работы.

Интенсивность линейного износа I_h определяется толщиной изношенного слоя, Δh приходящейся на единицу пути трения L_t,

$$I_h = \frac{\Delta h}{L_t}; \qquad (2.1)$$

или по изменению объёма или массы истираемого тела:

$$I_h = \frac{\Delta V}{L_t A_t}; \qquad (2.2)$$

$$I_h = \frac{\Delta M}{\rho L_t A_t}, \qquad (2.3)$$

где ρ – плотность изнашиваемого материала;

ΔV, ΔM – изменение объёма и массы истираемого тела (абсолютный износ);

A_t - площадь поверхности истираемого элемента.

При неизменном значении площади изнашивания, например на участке стационарного износа, целесообразно пользоваться интенсивностью износа по массе:

$$L_t = \frac{\Delta M}{L_t}; \tag{2.4}$$

или по объёму:

$$I_V = \frac{\Delta V}{L_t}. \tag{2.5}$$

Интенсивность линейного, объёмного и массового износов находится между собой в следующей зависимости:

$$I_h = \frac{I_V}{A_t} = \frac{I_t}{\rho A_t}. \tag{2.6}$$

При разработке методов расчёта износостойкости исходят из различных физических концепций механизма изнашивания. При абразивном изнашивании М.М. Хрущёв, считая, что износ является в основном следствием микрорезания, определил, что интенсивность изнашивания обратно пропорциональна твёрдости. Им установлено много закономерностей и расчётных характеристик этого вида изнашивания.

В последнее время все более пристально рассматривают механизмы износа, исходя из энергетических представлений. При этом предлагается ряд инвариантных критериев поверхностного разрушения. В их число входят:

- удельная работа изнашивания, определяемая как отношение мощности трения N_t к интенсивности I_h. Б.И.Костецким и В.А. Ляшко установлено, что критерий удельной работы изнашивания сохраняет свою инвариантность только в пределах одного вида износа, характеризуемого определённым (неизменным) структурным механизмом поверхностного разрушения. Это критерий для различного вида изнашивания (абразивного, окислительного, механического, фретинга и др.) может различаться на несколько порядков;

- критическая плотность энергии деформации, критерий, предложенный Л.И. Погодаевым применительно к поверхностному разрушению материалов при изнашивании в жидких средах, разработанный в развитии структурно-энергетического подхода И.А.Одинга и В.С.Ивановой;

- критическая плотность внутренней энергии, критерий, предложенный В.В.Фёдоровым. Им экспериментально установлена независимость критической плотности внутренней энергии и её связь с энергией, расходуемой на нагрев металла и его плавление;

- критерии, основанные на оценке значения поверхностной энергии как работы, затрачиваемой на образование новой поверхности (Е.Рабинович, Г. Флейшер, В.Д.Кузнецов, В.В. Копытко и другие);

- энтропийно - энергетические критерии успешно разработанные Л.И. Бершадским. Эти критерии являются дальнейшим развитием структурно-энергетического подхода, поскольку энтропия является прямой количественной мерой структурной разупорядочности.

С учётом энергетических представлений предложены расчётные формулы для прогнозирования износа трудящихся пар (В.С.Хачатурян, В.В.Фёдоров и другие). Однако наибольшее распространение получил метод расчёта и расчётные характеристики, предложенные И.В.Крагельским. Им и его сотрудниками приведены доказательства необходимости учитывать усталостные механизмы разрушения поверхностных слоёв при трении независимо от вида изнашивания.

Контактирование при трении осуществляется по поверхностям, шероховатость которых определяется параметрами и кривой опорной поверхности, рассмотренных в [60]. Расчётные формулы, выведенные И.В. Крагельским, предусматривают трение и изнашивание по поверхности упругодеформируемого тела. Шероховатость моделируется набором шаровых сегментов одинакового радиуса, расположенных по высоте таким образом, что распределение в слое модели и реальной поверхности описывается одинаковой опорной кривой. Основное уравнение для расчёта износа при множественном контакте по методу И.В. Крагельским имеет вид [31]:

$$I = \kappa_1 \alpha \sqrt{\frac{h}{R}} \frac{\rho_a}{\rho_r} \frac{1}{n}, \qquad (2.7)$$

где k_1 – множитель, определяемый геометрической конфигурацией и расположением по высоте единичных неровностей на поверхностях; обычно $k_1 = 0{,}2$;

$\alpha = \frac{A_a}{A_r}$ - коэффициент перекрытия;

ρ_a – давление на площади Аа (номинальный);

ρ_r – давление на площади Ar (фактического контакта);

h – глубина внедрения;

R – радиус единичной микронеровности;

n – число циклов, приводящих к разрушению деформируемого объёма.

Интенсивность изнашивания по методу И.В.Крагельского может изменяться в пределах от 10^{-3} до 10^{-12}.

Анализ данных об износостойкости различных пар трения позволил И.В. Крагельскому и Г.М. Харачу составить следующие классы износостойкости (таблица 2.1) [39].

Таблица 2.1 – Классы износостойкости пар трения [5]

Параметры износа	Классы износостойкости пар трения									
	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Lg I min	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4
Lg I max	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3

Классы износостойкости определяют О-V – упругое деформирование при контактном взаимодействии; VI, VII – упругое пластическое деформирование; VIII, IX – микрорезание.

В формуле (2.7) каждый из членов имеет своё физическое значение. Первый член $\sqrt{h/R}$ выражает относительную глубину внедрения неровностей поверхностей, значение которой определяет вид контактирования. При упругом контакте для чёрных металлов это значение составляет менее 10^{-2} и для цветных – 10^{-4}.

Второй член – отношение ρ_a/ρ_r - определяет отношение площади фактического касания к номинальной, так как $\rho_a A_a = \rho_r A_r$, то отношение ρ_a/ρ_r всегда меньше 1. Для металлов оно находится в пределах 10^{-4}-10^{-2}, для эластомеров (полимеры, резины) – 10^{-2}-10^{-1}.

Третий член уравнения 1/n определяет способность материала к разрушению при повторном воздействии, т.е. определяет сопротивляемость усталости. Это отношение зависит от сорта материла, действующих напряжений. Наличия смазочной среды и д.р Оно изменяется в пределах 10^{-2}-10^{-10}.

Вычисление безразмерных значений уравнения (2.7) осуществляется для случая взаимодействия абсолютно жёсткой шероховатой, не имеющей волнистости поверхности с учётом параметров кривой опорной поверхности с упругодеформированным телом.

Первое безразмерное отношение:

$$\sqrt{h/R} = \left(2\frac{\rho_c}{\rho r}\right)^{1/2\upsilon} \Delta 1/2, \qquad (2.8)$$

где ρ_c – давление на контурную площадь;

$\Delta = \dfrac{R_{\max}}{R_b^{1/\upsilon}}$ - комплексная характеристика шероховатости;

$R = \dfrac{R_n R_{np}}{R_n + R_{np}}$ - приведённый радиус неровностей;

$R_п$ - радиус неровностей в поперечном сечении;
$R_{пр}$ – радиус неровностей в продольном сечении.

Второе отношение ρa/ρr раскрывают следующим образом:

$$\rho_r = 0{,}5E^{\frac{2\upsilon}{2\upsilon+1}}\Delta^{\frac{\upsilon}{2\upsilon+1}}, \tag{2.9}$$

а $$\rho_c = 0{,}2E^{0{,}8}\left(\frac{HB}{R_B}\right)^{0{,}4}\rho_a{}^{0{,}2}, \tag{2.10}$$

где E – модуль упругости;
R_B – радиус волны;
H_B – твёрдость по Бринеллю.

Третий множитель 1/n вычисляется с учётом того, что число циклов до разрушения убывает по мере увеличения действующих амплитудных значений напряжения. Кривую усталости для упругого контакта описывают эмпирически формулами степенного вида [39].

$$n = \left(\sigma_b / \sigma_{np}\right) \cdot t_y, \tag{2.11}$$

где σ_b - предел прочности при растяжении;
$\sigma_{пр}$ – действующее напряжение;
t_y - параметр кривой фрикционной усталости.

Изложенные теоретические основы износа используются при экспериментальной оценке износа, наплавленных шеек чугунных коленчатых валов.

2.3 Методика экспериментального определения износа наплавленных шеек коленчатых валов

На практике износостойкость восстанавливаемых деталей повышают различными методами, главными из которых являются: применение при наплавке износостойких материалов; создание оптимального микрорельефа рабочих поверхностей; применение термической или химико-термический обработки; поверхностное пластическое деформирование; лазерное упрочнение и др.

Повышение износостойкости рабочих поверхностей деталей должно быть оправдано экономически, что подразумевает рациональный выбор способа восстановления, подтверждаемый обеспечением срока эксплуатации при наименьшей себестоимости восстановления. Одним из ответственных этапов исследований является определение износостойкости восстанавливаемой поверхности и сравнение её с износостойкостью основного материала коленчатого вала. При этом износостойкость деталей восстановленных наплавками зависит от применяемого материала.

Поскольку, при восстановлении мы используем присадочную проволоку с подачей в зону дуги ферромагнитной шихты сложного состава защищённого патентом РК, проведение исследований по износостойкости покрытий также становится обязательным.

В настоящее время определение величины износа производят следующим основными методами [22]:

- микрометрированием;
- весовым;
-химическим анализом;
-спектральным анализом;
-профилографированием;
-искусственных баз;
-с применением радиоизотопов.

Перечисленные методы имеют как положительные, так и отрицательные стороны.

Микрометрированием можно определить только значительные износы деталей машин, с учетом погрешностей приборов, поверхностей и т.д.

Весовым методом пользуются при определении износа деталей с небольшой массой.

Химический и спектральный анализ требуют дорогостоящего оборудования, высококвалифицированных специалистов, а также повышенных требований к технике безопасности при работе с изотопами.

Метод искусственных баз, в сравнении с вышеописанными методами имеет ряд преимуществ: сравнительно невысокая стоимость приборов для нанесения углублений специальной формы достаточно высокую точность при определении величины износа, его простота и т.д.

Сущность метода заключается в следующем, на поверхность детали, подвергающейся износу, наносят специальным прибором углубление заранее известного профиля. Зная его размеры до и после испытаний можно определить величину износа.

Определение износа шеек методом искусственных баз производилось путем испытаний образцов на износ.

Цель испытания – установление относительной износостойкости шеек коленчатых валов двигателя ЗМЗ-53, восстановленных различными способами.

Объект испытаний – образцы вырезанные из коренных шеек коленчатых валов следующих серий:

- серия 1 – чугун высокопрочный ТУ-2544 (образцы из нового коленчатого вала – эталон);

- серия 2 – образцы из коленчатого вала восстановленного широкослойной наплавкой проволокой 15 ГЮСТЦА с добавкой в дугу ферромагнитного порошка сложного состава;

- серия 3 – образцы из коленчатого вала восстановленного по технологии ГОСНИТИ проволокой 15 ГЮСТЦА, охлаждаемого сжатым воздухом.

Испытания проводились на машине трения СМЦ-2 по схеме трения «вал вкладыш». На рисунке 2.1 показана схема нагружения исследуемой пары, а на рисунке 2.2 машина трения СМЦ-2. Для проведения испытаний изготавливаются образцы из вкладышей колодки [61].

Колодки вырезаются из комплекта стандартных вкладышей, изготовленных из тонкой триметаллической ленты, состоящей из стального основания, металлокерамического подслоя и антифрикционного слоя СОС-6-6. Размер колодок принимается равным 10х8мм, площадью трения $S=0{,}8см^2$. Образцы вырезаны из коренных шеек коленчатых валов. Каждая серия включает по 3 образца.

Вырезанные ролики перешлифовываются под второй ремонтный размер, до $69{,}75^{-0.06}$ мм и окончательно обрабатываются полированием пастой ГОИ с помощью фетра до 10 класса чистоты. С одной установки шлифуются и полируются одновременно 3 образца, по одному образцу из каждой серии, рисунок 2.3. Режимы полирования соответствуют техническим условиям чистовой обработки коленчатых валов ЗМЗ-53 и имеют следующие значения:

- число оборотов образца n=100об/мин;

- время полирования t=12мин.

Перед испытанием у образцов замеряется твердость по Роквеллу (рисунок 2.4). Как уже отмечалось, целью испытаний является установление относительной износостойкости и поэтому все образцы в процессе испытаний должны подвергаться воздействию одних и тех же параметров режима:

- скорость скольжения – 1,32 м/с;

- удельное давления при испытаний- $20кг/см^2$;

- время приработки-20 часов;

- подача масла- капля за 25 сек;

-продолжительность испытания для определения износостойкости трущейся пары – 100 часов.

В качестве смазки применяется веретенное масло. Подбор смазки и выбор режимов испытания осуществлялся опытным путем, с целью получения надежных и сравнимых результатов.

Как отмечалось выше, для определения величины износа мы применили метод искусственных баз, при котором на поверхности ролика вырезаются лунки. Лунки нарезаются на приборе УПОИВ-2 (рисунок 2.5). Схема вырезания лунки показано на рисунке 2.6.

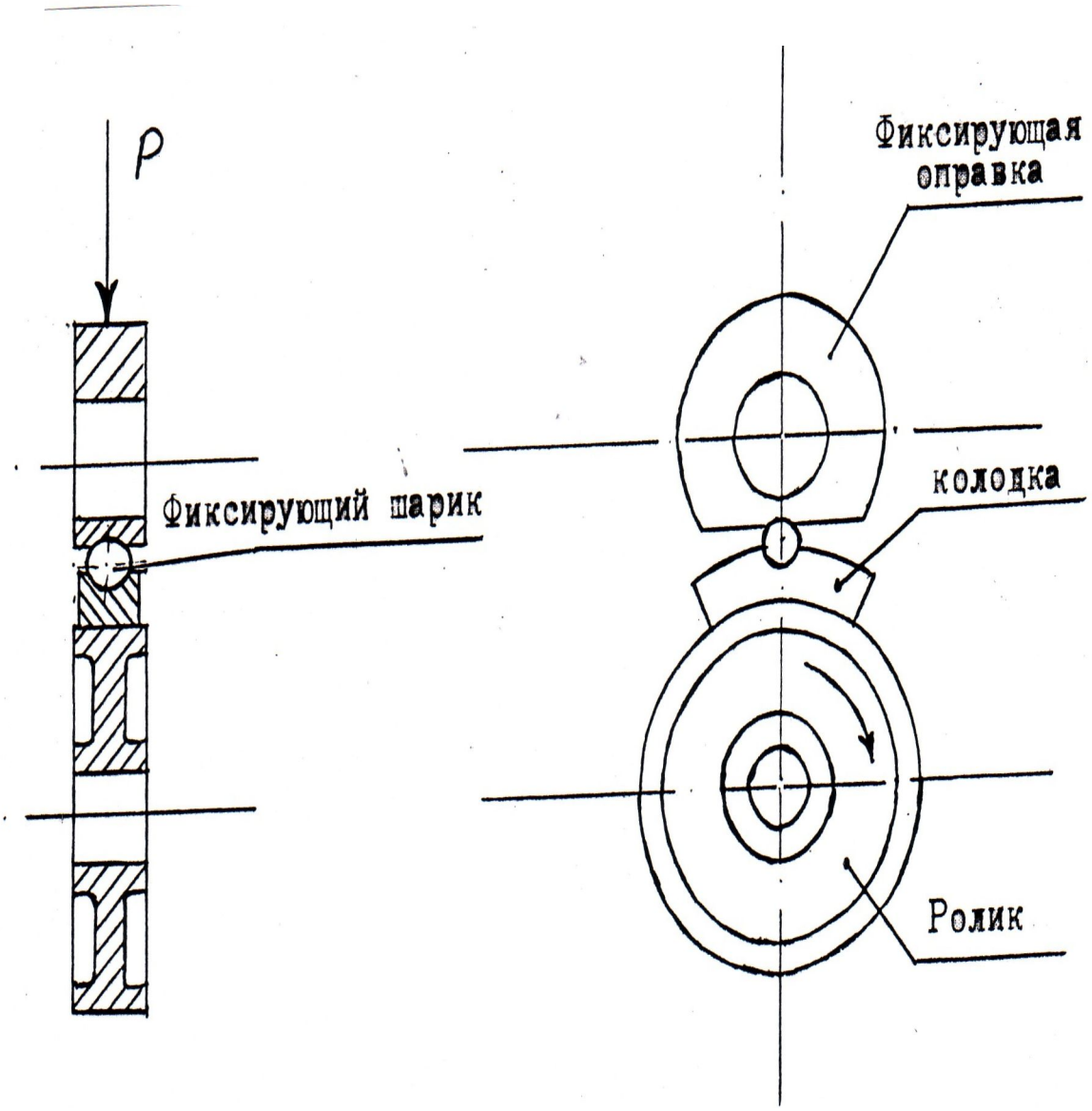


Рисунок 2.1 – Схема нагружения при испытании на изнашивание деталей на машине трения СМЦ-2.



Рисунок 2.2 – Машина трения СМЦ-2 с пультом управления.

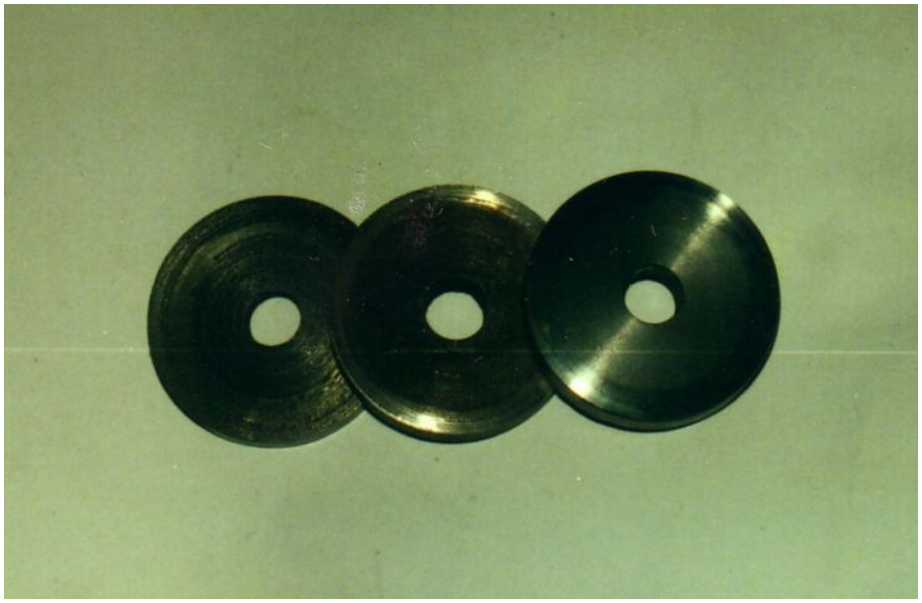


Рисунок 2.3 – Образцы для исследования износостойкости.



Рисунок 2.4 – Измерение твердости поверхности образцов.



Рисунок 2.5 – Прибор для нарезания лунок УПОИВ-2.

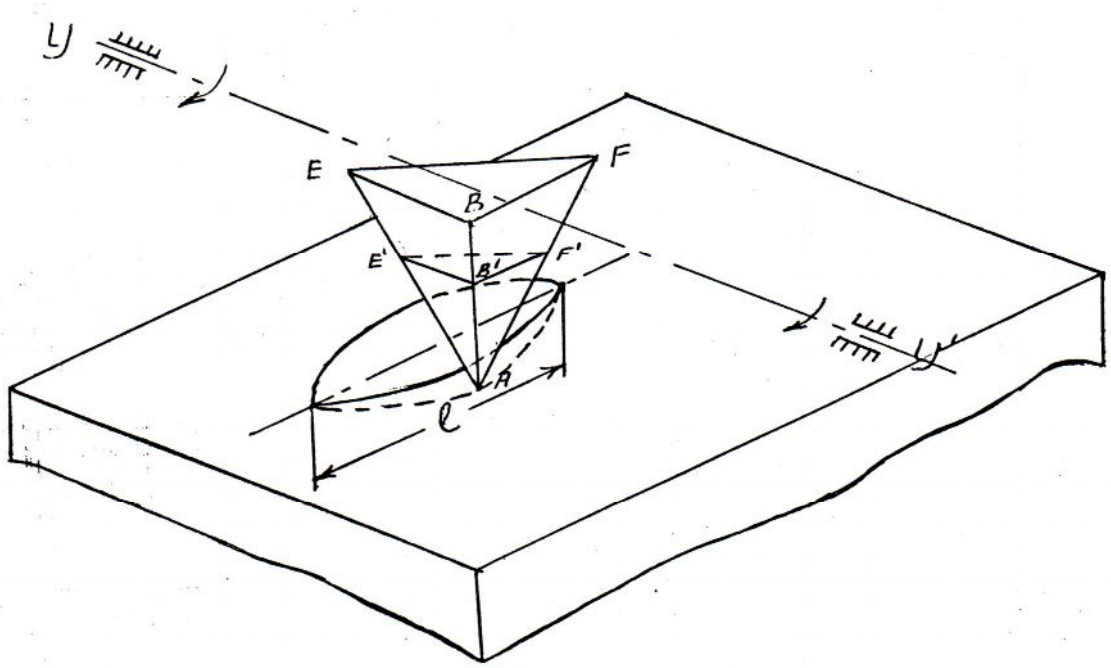


Рисунок 2.6 – Схема нарезания лунок

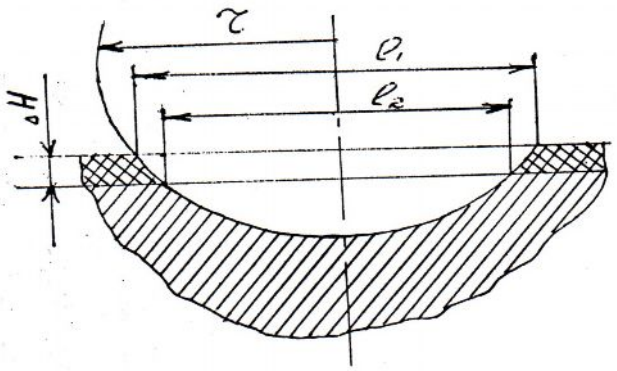


Рисунок 2.7 – Схема к расчетной формуле 2.12

Процесс нарезания лунок можно разделить на следующие операции:

- установить ролик в призму прибора и сцентрировать;
- сфокусировать микроскоп на поверхность ролика;
- вращением привода резца вырезать лунку.

Лунки вырезают через 60^0 всего 6 штук на 1 ролик. Длина вырезанной лунки L=1-1.2мм и по глубине составляет 0,04мм. При нарезании лунки необходимо учесть, что поверхность шейки имеет высокую твердость HRC 56-60 и если процесс нарезания производить с большой подачей резца, их

параметры – длина, глубина не будут соответствовать расчетным, в результате действия сил упругой деформации. Избежать этого можно, увеличив число проходов резца, и вырезание лунки производить за 10-12 проходов, вращая за предохраняющий маховичок прибора.

Формула расчета износа применяется как для плоской фигуры (рисунок 2.7) поскольку лунка ориентирована вдоль образующей шейки:

$$\Delta H = 0{,}125\left(l_1^2 - l_2^2\right)\left(\frac{1}{l_2} - \frac{1}{l_1}\right), \qquad (2.12)$$

где: 0,125-расчетный коэффициент;

l_1, l_2 - длина лунки, соответственно до и после испытаний.

Износ колодок определяется путём взвешивания на трех этапах испытаний:

-исходное взвешивание до испытаний;

-после приработки в течение 20 часов;

-после всего цикла испытаний в течение 120 часов.

Взвешивание проводилось на аналитических весах 2-го класса типа АД-200. Перед каждым взвешиванием, образцы обрабатываются техническим спиртом и выдерживаются в сушильном шкафу при 80^0С в течение часа [61].

2.4. Теоретические основы усталостной прочности чугунных коленчатых валов

Многочисленными исследованиями установлено, что применение наплавочных процессов значительно снижает усталостную прочность восстанавливаемых деталей в особенности деталей работающих в условиях знакопеременных циклических нагрузок. Для чугунного коленчатого вала работающего в условиях знакопеременных циклических нагрузок, восстановленного наплавкой проведение исследований по усталостной прочности обязательно.

Разрушение под действием динамических нагрузок циклически изменяющихся по времени (циклические напряжения) относят к усталостным. При изменении знака напряжения относят к знакопеременным, а при одном знаке – пульсирующими.

Закономерности изменения циклически напряжений по времени на практике бывают самыми различными – от беспорядочных мало поддающихся какой-то регламентации до вполне определённых. Некоторые довольно часто встречающиеся периодические закономерности циклических напряжений представлены на рисунке 2.9, а, б, в. Когда фактический закон изменения во времени циклической нагрузки установить трудно, его условно принимают за синусоидальный (рисунок 2.8, г) [39, 42, 62].

К характеристикам циклического нагружения относятся:

- цикл напряжений – совокупность последовательных значений переменных напряжений за один период процесса их изменения;

- период цикла t – время одного цикла напряжений;

- максимальное напряжение цикла σ_{max}, МН/м^2 (кгс/мм^2),- наибольшее по алгебраическому значению напряжение цикла, равное алгебраической сумме среднего напряжения цикла и амплитуды;

- минимальное напряжение цикла σ_{min}, МН/м^2 (кгс/мм^2),- наименьшее по алгебраическому значению напряжение цикла, равное алгебраической разности среднего напряжения цикла и амплитуды.

Амплитуда цикла:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \tag{2.13}$$

Среднее напряжение цикла:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \tag{2.14}$$

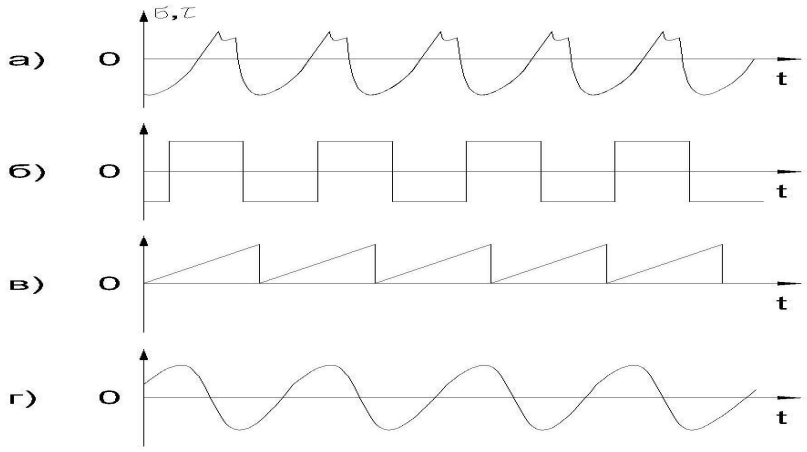
Размах цикла:

$$2\sigma_a = \sigma_{max} - \sigma_{min} \tag{2.15}$$

Коэффициент асимметрии цикла или коэффициент амплитуды цикла:

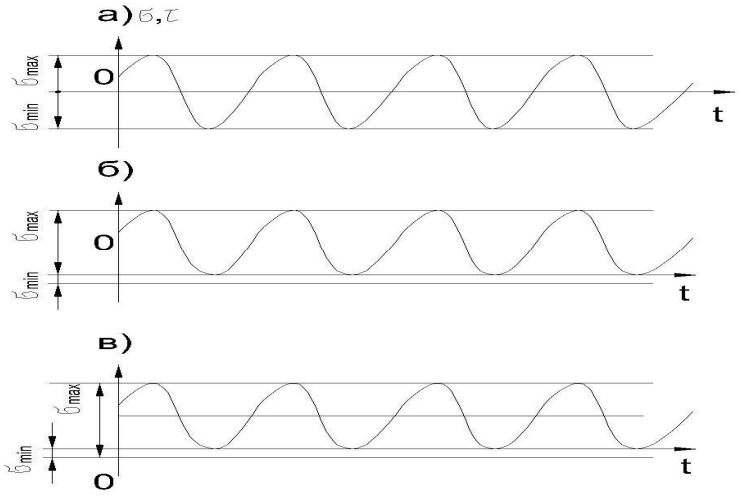
$$R = \sigma_{min} / \sigma_{max} \qquad R = \tau_{min} / \tau_{max} \tag{2.16}$$

Различают симметричный и не симметричный циклы. В первом случае, σ_{max}, τ_{max} и σ_{min}, τ_{min} равны по абсолютному значению, но противоположны по знаку (рисунок 2.9, а). При несимметричном цикле напряжений (рисунок 2.9,б) эти значения не равны по своему значению и могут иметь как разные знаки, так и быть одного знака (пульсирующие напряжения, рисунок 2.9, в). Для симметричного цикла R = -1.



а – общий случай периодической закономерности;
б – прямоугольный;
в – пилообразной;
г – синусоидальный.

Рисунок 2.8 – Графики циклических нагрузок, наиболее часто встречающихся в практике.



а – симметричный цикл;
б – несимметричный цикл разного знака нагружений;
в – несимметричный пульсирующий цикл.

Рисунок 2.9 – Виды циклов напряжений при циклическом нагружении конструкций.

Способность металла противостоять усталости (выносливости) определяется пределом выносливости (предел усталости) σ_{R1} , МН/мм^2 (кгс/мм^2), - значение максимального напряжения цикла с асимметрией R, соответствующая заданной долговечности. Предел выносливости при симметричном цикле σ_{-1} – предел выносливости при условии, что $\sigma_{max} = \sigma_{min}$, но противоположны по знаку (R=-1).

Усталость различают много и малоцикловую, т.е. когда соответственно $\sigma_{-1}<\sigma_T$ и $\sigma_{-1}>\sigma_T$. В первом случае образование макротрещин, или полное разрушение, происходит в упругопластической области при числе циклов разрушения менее $5\cdot10^4$ и более, а во втором усталостное разрушение происходит в упругопластической области при числе циклов разрушения не менее $5\cdot10^4$.

Усталостные разрушения наблюдаются как в вакууме, так и на воздухе или в любой инактивной и активной (коррозионной) среде. Ускоряют процессы разрушения наличие трения, прессового соединения и др. Общее уравнение циклического напряжения:

$$\sigma = \sigma_T + \sigma_a f(t), \qquad (2.17)$$

где $\sigma_a f(t)$ – зависимость изменения колебаний амплитуды напряжений за время одного цикла.

Для симметричного цикла уравнение подчиняется синусоидальному закону:

$$\sigma = \sigma_T + \sigma_a \sin(\omega t + \varphi), \qquad (2.18)$$

где ω – частота циклов;

φ – угол, определяющий начальную фазу.

Аналогичные зависимости будут иметь и циклы, определяемые касательными напряжениями. Количество циклов, потребное для разрушения различных деталей, зависит от условий эксплуатации. В таблице 2.2 представлены сведения о количестве циклов потребных для разрушения некоторых массовых деталей подвижного состава, рельсов и другой техники.

Таблица 2.2 – Количество циклов изменения напряжений соответствующих разрушению некоторых деталей [5]

Наименование деталей	Количество циклов
Вагонные оси	$50\cdot10^6$
Железнодорожные рельсы	$15\cdot10^6$
Оси локомотивов	$400\cdot10^6$
Коленчатые валы авиационных двигателей	$120\cdot10^6$
Коленчатые валы автомобильных двигателей	$120\cdot10^6$
Поршневые штоки, шатуны	$1000\cdot10^6$
Валы паровых турбин	$15000\cdot10^6$

На усталость металлов оказывают влияние многие факторы, поэтому степень этого влияния оценивается различными коэффициентами. К ним относятся:

1. Коэффициент концентрации напряжений:

$$a_\sigma = \sigma_{\max} / \sigma_H \ , \qquad (2.19)$$

где $\sigma_{\max}$ – максимальное напряжение в зоне действия концентрации напряжений;

σ_H – номинальное напряжение в том же сечении, (рисунок 2.10) .

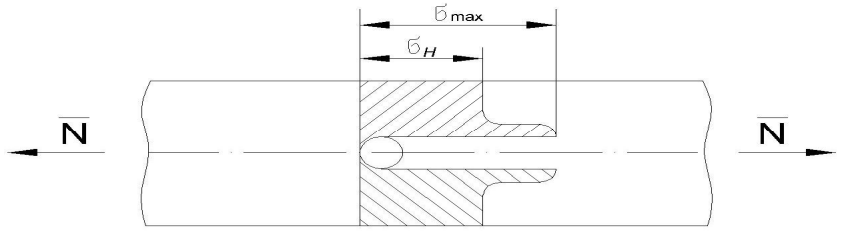


Рисунок 2.10 – Схема изменения напряжений в зоне их концентрации

2. Эффективный коэффициент концентрации напряжений:

$$\kappa_\sigma = \sigma_{-1} / \sigma_{-1\kappa}, \tag{2.20}$$

где $\sigma_{-1\kappa}$ – предел выносливости металла при наличии концентрации.

3. Масштабный фактор:

$$\varepsilon_\sigma = \sigma_{-1\partial} / \sigma_{-1}, \tag{2.21}$$

где $\sigma_{-1д}$ – предел выносливости образца произвольного диаметра;
σ_{-1} – предел выносливости образцов диаметром 7,5 мм.

4. Коэффициент интенсивности напряжений при разрушении в условиях плоской деформации по механизму отрыва:

$$\kappa_1 = Y\sigma\sqrt{\pi l}, \tag{2.22}$$

где σ – напряжение растяжения в направлении, перпендикулярном трещине длиной l;

У – тарировочный коэффициент, учитывающий геометрию образца.

В 1957 году Ирвин ввёл энергетический критерий хрупкого разрушения:

$$\kappa_{1c} = Y\sigma_c\sqrt{\pi l}\,, \qquad (2.23)$$

где σ_c – напряжение от критической нагрузки Рс, при которой трещина начинает распространяться.

5. Максимальное значение коэффициента интенсивности напряжений κ_{max}, МН/м^2 (кгс/мм^2), - наибольшее значение коэффициента интенсивности напряжений при циклическом изменении нагрузок.

6. Минимальное значение коэффициента интенсивности напряжений κ_{min}, МН/м^2 (кгс/мм^2), - наименьшее значение коэффициента интенсивности напряжений при циклическом изменении нагрузок.

7. Размах интенсивности напряжений цикла:

$$\kappa = \kappa_{\max} - \kappa_{\min}. \qquad (2.24)$$

Испытание на усталость проводят на различных испытательных машинах, позволяющих осуществлять следующие программы изменения амплитуды циклов:

а) с постоянными амплитудными значениями напряжений при синусоидальной (гармонической) или реже другой форме цикла;

б) бигармонической;

в) с переменной частотой (с изменением периода циклов);

г) программированный блочный цикл;

д) с воспроизведением эксплутационного спектра с переменой во времени σ_a;

е) с включением одиночных перегрузок в гармонический цикл.

Основные программы изменения амплитуд приведены на рисунке 2.11

Схему нагружения выбирают таким образом, чтобы воспроизвести в образцах напряжённое состояние, характерное для эксплуатационных условий работы деталей и воспроизвести в образце или детали излом, подобный эксплуатационному.

К основным типам нагружения относятся:

а) чистый изгиб при вращении;

б) то же в одной плоскости;

в) поперечный изгиб при вращении круглых консольных образцов;

г) то же в одной плоскости круглых и некруглых образцов;

д) поперечный изгиб круглых консольных и некруглых образцов при вращении силовой плоскости;

е) переменное кручение круглых образцов.

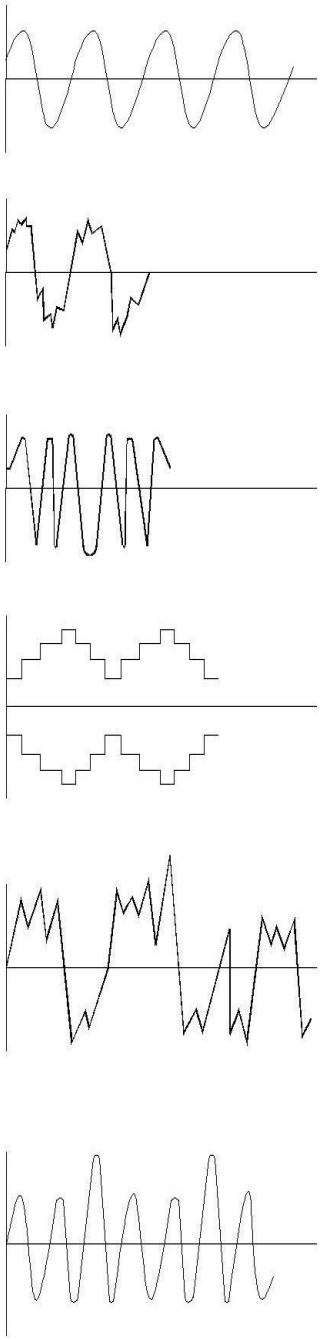


Рисунок 2.11 – Различные формы изменения амплитуд напряжений циклов

От соотношения значений касательных и нормальных напряжений зависит сопротивление усталостному разрушению и его характер.

При испытаниях на усталость используют два вида нагружений: так называемое мягкое, с заданным размахом нагрузки и жесткое — с заданным размахом деформации. В первом случае нагрузка постоянна на всем протяжении испытания. При жестком нагружений усилие изменяется в зависимости от изменения жесткости нагружаемой системы. При мягкой схеме

нагружения с постоянной амплитудой напряжений образцы выдерживают большее количество циклов нагружений, чем при жесткой схеме.

Более соответствует условиям эксплуатации и потому в большей степени распространены испытания с заданным размахом напряжений. Однако наблюдается работа деталей в условиях постоянства деформаций или в смешанных условиях. К ним относятся баббитовый слой подшипников скольжения, относящихся к типу беззазорных, которые, несмотря на износ, постоянно прижимаются к шейке, шатунно-кривошипных механизмов.

Результаты испытаний на усталость фиксируются на соответствующих диаграммах усталости, или, как их называют, кривых Веллера. Кривая усталости определяет зависимость между максимальными или амплитудными значениями напряжений цикла и долговечностью образцов одного типа и размеров. Основные типы кривых усталости представлены на рисунке. Наиболее распространенным типом является кривая с четко выраженным горизонтальным участком (рисунок 2.12, а). В этом случае выявляется физический предел усталости.

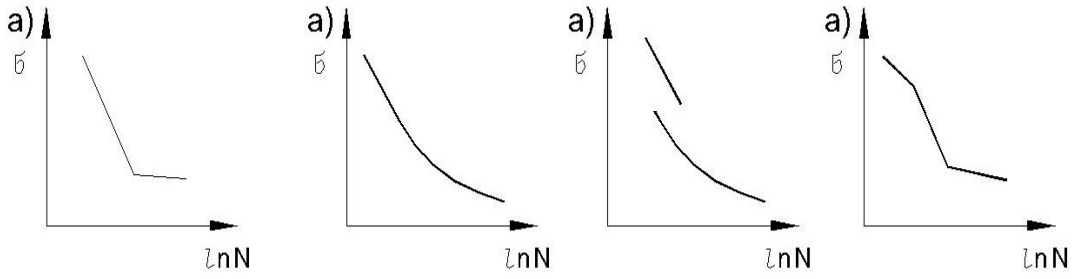


Рисунок 2.12 – Основные типы экспериментальных кривых усталости

Кривые такого типа характерны для черных металлов. Кривые усталости с наклонным участком к оси абсцисс (рисунок 2.12, б), у которых предел выносливости является условным, характерны для цветных металлов, а также для черных металлов, испытывающих циклическое нагружение в коррозионной среде или в условиях фретинг - коррозии.

Появление разрывов и ступенек на кривой усталости (рисунок 2.12, в) являются возможными вследствие:

- смены напряженного состояния перед вершиной трещины и в связи с этим переходом от плосконапряжённого состояния к условиям плоской деформации, сопровождаемой ростом уровня напряжений;;

- перехода от межзеренного разрушения к внутрикристаллическому, что также связано с перераспределением напряжений и изменением их уровня;

- изменения месторасположения разрушения в связи с различной долей влияния на усталость фретинг-коррозии и сдвиговой деформации при трении;

- неравномерного распределения деформации по сечению, приводящему к более раннему пластическому течению поверхностных слоев, изменения числа действующих систем плоскостей скольжения, перехода от циклической ползучести к усталостному разрушению в малоцикловой области.

Иногда проявляется неравномерный темп изменения напряжений в области перегрузок (рисунок 2.12, г).

На рисунке 2.13 представлена полная кривая усталости в диапазоне нагрузок от предела прочности до предела выносливости (линия А Ж). Кривая имеет ряд характерных перегибов и областей. Прежде всего кривая усталости разделяется на области мало- и многоцикловой усталости. Границу определяет напряжение, равное динамическому пределу текучести (участок IV), т. е. пределу текучести, определенному при скорости нагружения усталостных испытаний.

Область малоцикловой усталости (линия АБВГ) разделяется на три характерных участка. На участках I и II разрушение носит квазистатический характер с образованием шейки в месте излома. На участке III в изломе уже можно отчетливо выделить зону усталостного разрушения.

Ниже границы динамического предела текучести лежит область многоцикловой усталости (линия ДЕ, участок V). При напряжениях $\sigma<\sigma\omega$ лежит область безопасных повреждений (область VI). Особенности поведения металлов в трех участках малоцикловой усталости следующие:

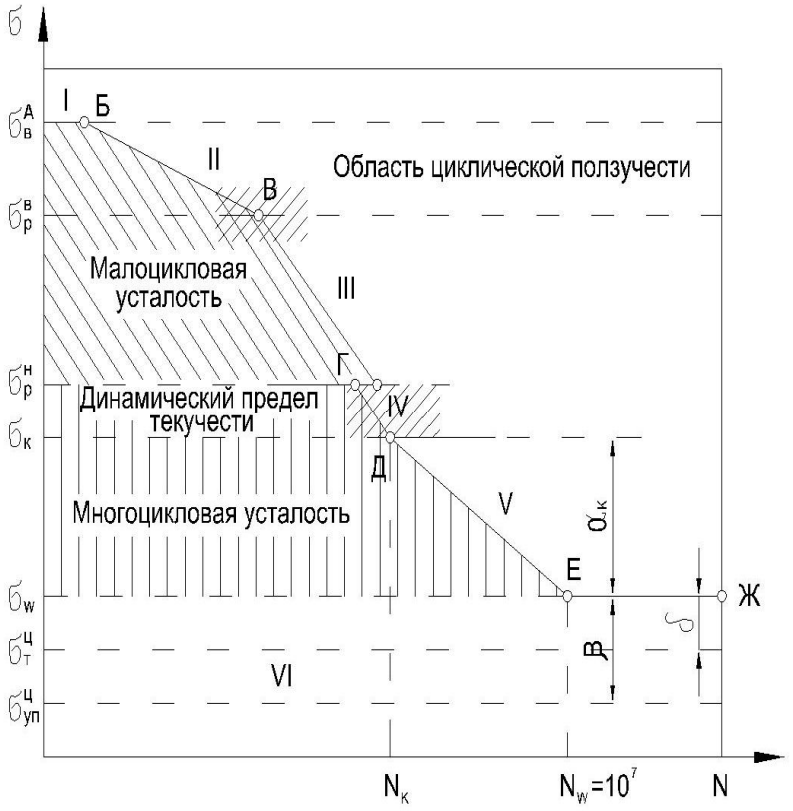
а) квазистатический излом (участок I). Разрушение возникает на этом участке при N = 1 цикл или несколько десятков или сотен. Участок квазистатического излома не всегда удается получить из-за большего разброса экспериментальных данных при напряжениях на уровне предела прочности;

б) циклическая ползучесть (участок II) характеризуется непрерывным накоплением пластической деформации. Протяженность этого участка определяется в основном формой цикла нагружения, формой образцов (гладкие, с надрезом) и исходным состоянием металла. У упрочняющихся материалов (алюминиевые сплавы, некоторые легированные сорта сталей и др.) участок II отсутствует;

в) участок усталостного разрушения при макроскопической деформации (участок III). На этом участке пластические деформации накапливаются менее интенсивно.

По мнению В. С. Ивановой, основным фактором, определяющим долговечность при малоцикловой усталости, должна быть деформация, приложенная за цикл, а различия в свойствах металла имеют второстепенное значение.

При проведении испытаний на усталость учитывают вид напряженного состояния, форму цикла нагружения и коэффициент асимметрии. Условия проведения испытаний выбирают с учетом условий эксплуатации деталей [39].



σ_B – временное сопротивление;

σ_P^B – напряжение верхнего разрыва (первый вид разрыва);

σ_P^H – напряжение нижнего разрыва (второй вид разрыва);

$\sigma_к$ – критическое напряжение (третий вид разрыва);

σ_w – предел усталости;

$\sigma_T^Ц$ – циклический предел упругости;

N_k – критическое число циклов;

$\alpha_к, \delta, \beta$ – константы.

Рисунок 2.13 – Схематическое изображение полной кривой усталости [39]:

Наиболее просто определяют предел выносливости при симметричном цикле нагружения образца, работающего на чистый изгиб. Максимальное напряжение рассчитывают по формуле:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_x}{W_x}. \qquad (2.25)$$

Испытание повторяется при различных напряжениях σ_{max}, результаты представляются в виде кривой усталости, называемой также кривой Велера, рисунок 2.14. При этом каждый образец испытывается при σ_{max}= const вплоть до разрушения или до базового числа циклов N_0, которое должно составлять не

менее 108 циклов для металлов и сплавов, не имеющих горизонтальной асимптоты (например, цветные металлы и их сплавы); при наличии асимптоты N0 = 107 циклов (например, стали).

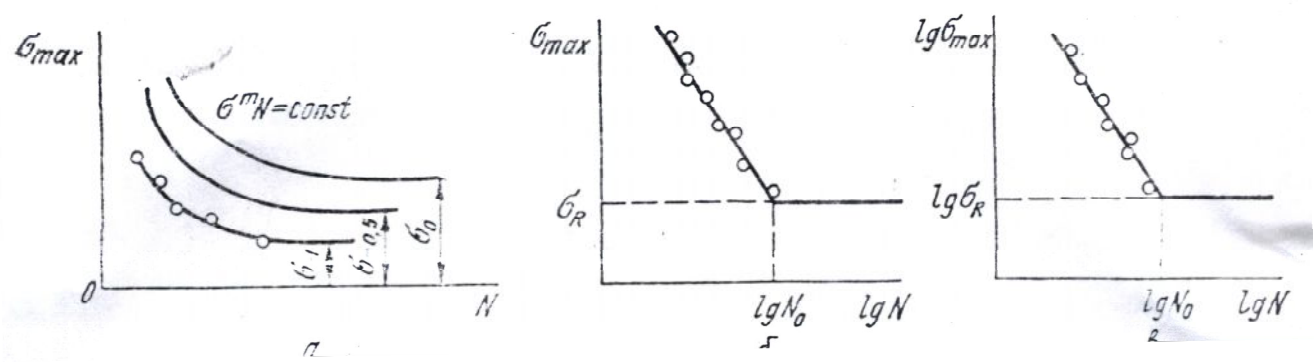
Левую часть усталостных кривых в некоторых пределах описывают уравнением:

$$\sigma_{\max}^{m} N = C, \qquad (2.26)$$

где C и m — постоянные, определяемые из эксперимента.

С учетом степенного характера этой зависимости кривую выносливости часто строят в координатах σ_{max}— lg N или lg σ_{max} — lg N, см. рисунок с тем, чтобы V левые ветви кривой усталости оказались прямыми линиями.

Подобно тому, как определяется предел выносливости при симметричном цикле, можно найти пределы выносливости и при асимметричном цикле напряжений. Для этого испытательные машины снабжаются дополнительными приспособлениями, которые позволяют создать в образце осевую силу. Существуют также испытательные машины для получения кривых выносливости при растяжении, сжатии, кручении, контактном взаимодействии и т. п.



σ_{max} – N (а) ; σ_{max} – lg N (б) ; lg σ_{max} - lg N (в).
Рисунок 2.14. Кривые Велера.

Поскольку определение пределов выносливости для различных коэффициентов асимметрии цикла является достаточно трудоемким, то расчеты на выносливость обычно базируются на использовании следующих характеристик материала: пределов выносливости при симметричном σ_{-1} и отнулевом σ_0 циклах, пределах прочности σ_{+1} = и текучести от σ_T.

В результате многочисленных исследовании установлен ряд зависимостей между статическими механическими характеристиками и пределом выносливости:

σ_{-1} = 0,45 σ_B для чугуна и углеродистых ; сталей),

σ_{-1} = 0,35 σ_B - 90 МПз (для легированных сталей),

σ_{-1} = 0,3 σ_B (для цветных металлов).

Для симметричных циклов нагружения существуют такие соотношения между пределами выносливости при изгибе σ_{-1}, кручении τ_{-1} и растяжении σ_{-1p}:

σ_{-1p}~$0,75_{\sigma-1}$, τ_{-1}~$0,6_{\sigma-1}$.

Приведённые эмпирические соотношения являются приближенными и могут быть использованы только для ориентировочной оценки предела выносливости.

2.5 Методика проведения испытаний на усталостную прочность коленчатых валов

Объектом исследования являются коленчатые валы двигателей ЗМЗ-53 образцы из которых изготавливались без дополнительных технологических воздействий, после восстановления на исследуемом кривошипе коленчатого вала. Исследованию подвергаются три серии коленчатых валов ЗМЗ-53:

- эталонная, новые коленчатые валы производства Заволжского моторного завода;
- восстановленные наплавкой по технологии ГОСНИТИ (Государственный научно-исследовательский технологический институт);
- коленчатые валы ЗМЗ-53, восстановленные наплавкой по технологии Каз НАУ.

Целью проведения настоящих исследований является определение количественных характеристик усталостной прочности испытуемых коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53 и сравнение их между собой. Это, в конечном итоге, позволит оценить и получить сравнительные результаты по усталостной прочности для испытанных серий коленчатых валов ЗМЗ-53.

Испытания коленчатых валов трёх исследуемых серий на усталость проводились в лаборатории механических испытаний отдела ремонта автомобилей КазНИПИАТ на усталостном стенде КазНИПИАТ 64 «Н», см. рисунок 2.15.

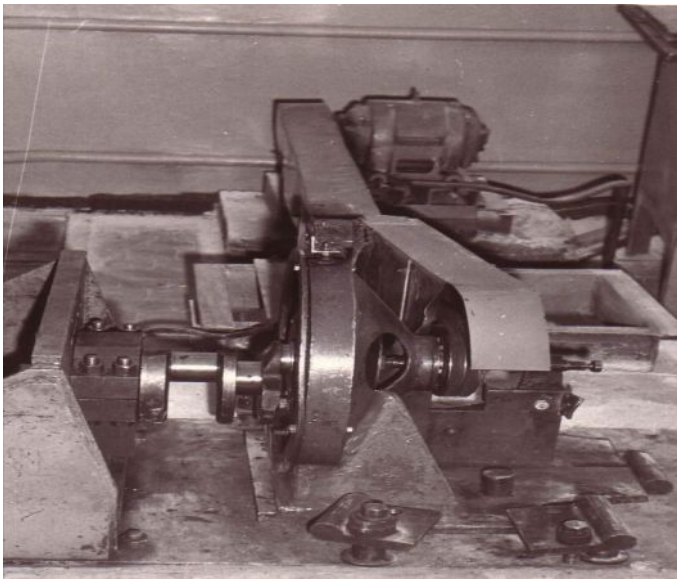


Рисунок 2.15 – Общий вид стенда для испытаний на усталость

В области натурных усталостных испытаний автомобильных деталей КазНИПИАТ-ом накоплен 30-летней опыт. Им испытывались коленчатые валы ГАЗ-51, полуоси ЗИЛ-130 и ЗМЗ-53 и др. детали [63, 64].Поэтому для сохранения преемственности и сопоставимости получаемых данных наших испытаний, вопросы методического и организационного характера приняты без изменений.

Образцы для исследований коленчатых валов двигателя ЗМЗ-53 выбирают из готовых к постановке на двигатель. Для этого целый вал разрезается по средней (третьей) коренной шейке, где проходит плоскость симметрии. Остатки коренной шейки, четвертая и пятая шейки полностью удаляются.

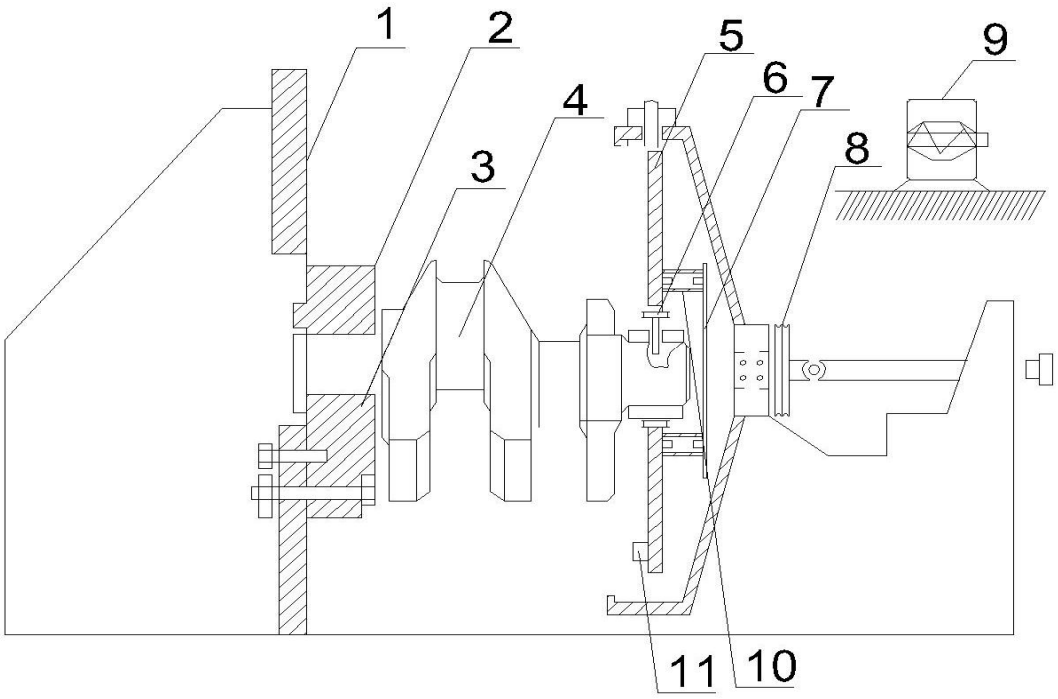
Вблизи плоскости реза допускаются температурные воздействия на вторую и третью шатунные шейки и на третью и шестую щеку. Никаких технологических воздействий на первую и четвертую шатунную, первую и пятую коренную шейки и щёки №1,2,7,8 не допускается. Из одного коленчатого вала, таким образом, получается два одинаковых натурных образца.

Порядок технологических операций при этом был принят следующий:

1. Изготовление втулки переднего конца вала и её напрессовки.
2. Формирование обточкой и шлифовкой в центрах шейки защемления.
3. Разрезание вала по средней, третьей коренной шейке (по плоскости симметрии).
4. Маркировка образцов попарно.
5. Удаление фрезерованием (обточкой) остатков шейки и щеки, формуя тем самым шатунную шейку для посадки диска – возбудителя.
6. Создание фрезеровкой лыски, удерживающей вал от проворота и сверление отверстия диаметром 8-12мм глубинной 10-12мм под контрящий штифт переходных втулок посадки возбуждающего диска.
7. Окончательная маркировка образцов по сериям и внутри серий.
8. Магнитный контроль образцов коленчатых валов на наличие трещин.

Испытания проводились на стенде для натурных усталостных испытаний автомобильных деталей, осуществляющем нагружение изгибом от сил инерции детали установленной и надежно закрепленной за один из концов, при вращении силовой плоскости согласно ГОСТ 2860-65 [26].

Принципиальная схема усталостной машины КазНИПИАТ типа 64«Н» показана на рисунке 2.16.



1- плита стенда;
2- крышки;
3- зажим;
4- образец коленчатого вала;
5- диск возбудитель;
6- подшипник 11706;
7- ведущий диск;
8- ведомый диск;
9- электромотор;
10- эластичные втулки;
11- дисбалансные массы.

Рисунок 2.16 – Принципиальная схема стенда 64 «Н» для испытаний на усталость

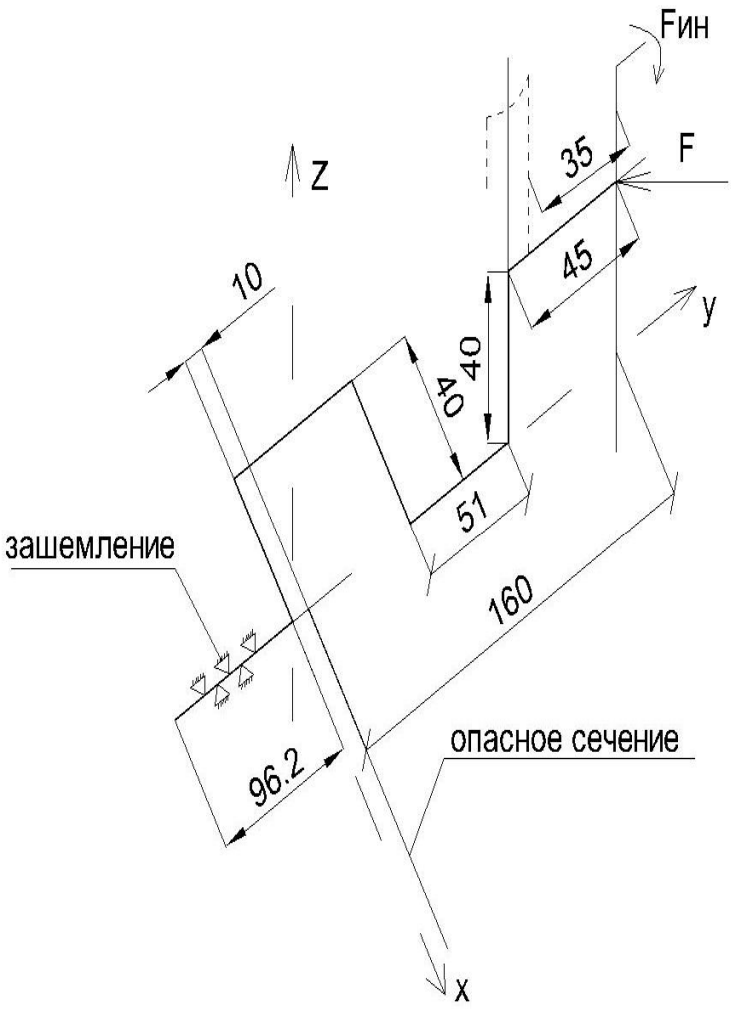
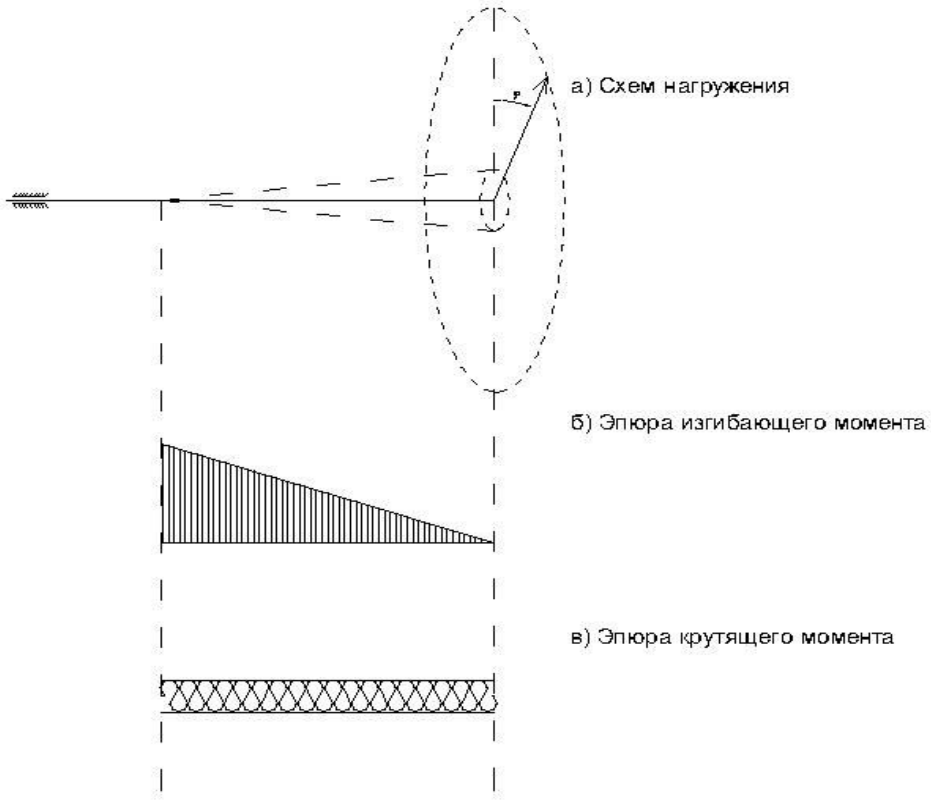
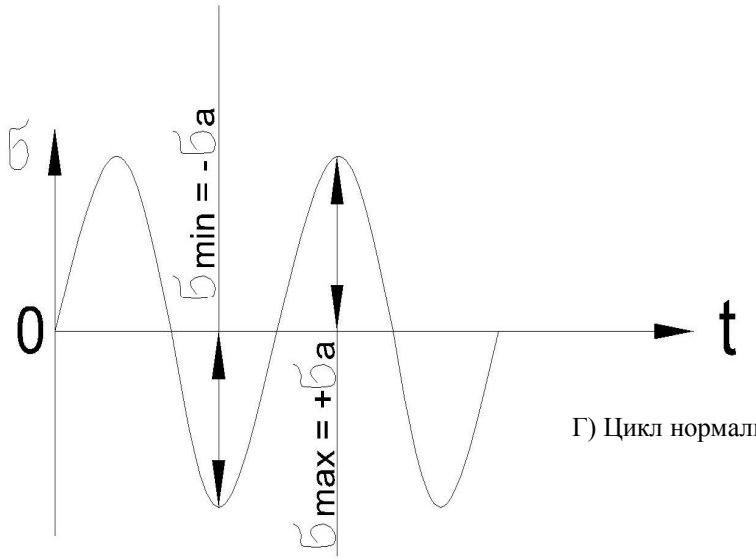


Рисунок 2.17 – Схема нагружения коленчатого вала ЗМЗ-53 при натурных усталостных испытаниях на машине 64 «Н» КазНИПИАТ.

От электромотора через промежуточную опору вращение передается ведущему диску 7, который через две эластичные втулки 10 приводит в движение диск – возбудитель 5. Передаточное отношение привода выбрано близким к единице таким образом, что частота возбуждения равна 25гц (1500об/мин). На диск возбудитель устанавливаются дисбалансные массы 11, величиной которых регулируется сила нагружения детали. Через радиальный двухрядный шариковый самоцентрирующийся подшипник качения №11216 и переходные втулки усилие передается на деталь 4.





Г) Цикл нормальных напряжений

Рисунок 2.18 – Схема испытаний, заложенная в основу стенда 64 «Н».

В общем случае рассмотренная система представляет консольно защемленную раму, рисунок 2.17, 2.18, нагруженную на свободном конце сосредоточенной силой $F_{ин}$, имеющей круговое вращение с частотой 25гц. Тип зажима выбран конструктивно с предварительным апробированием. С помощью шести болтов М20 зажим навешивается на несущую плиту 1,

имеющую жесткую связь с фундаментом машины. Нижняя половина зажима более жесткая, чем верхняя, и при переборках (смене) образца не снимается. Зажим имеет разъем в горизонтальной плоскости. Надежное защемление обеспечивается при затяжке 4-х болтов М18 крышки 2 и нижней половины зажима с моментом 30 кгм. Зажим обеспечивает защемление шеек образцов из коленчатых валов номинального и всех ремонтных размеров. Предложенная конструкция зажима довольно проста и отвечает требованию надежного защемления испытываемых коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53.

Место расположения опасного сечения определяется реальной схемой защемления, рисунок 2.17.Оно находится в крайних сечениях шатунной шейки возле защемленной усиленной щеки коленчатого вала на расстоянии, которое можно вычислить по следующей формуле:

$$L=124+l_1\ , \qquad (2.27)$$

где, L - плечо приложения нагрузка, мм;

l_1 - длина первого кривошипа от оси штифта до упорного бурта щеки колена, равная 36мм определяемая конструктивно.

В первом приближении принимаем плечо приложения нагрузки равным L=160мм. Учитывая неточность расположения стопорного штифта на образцах при изготовлении, следует величину l_1 сделать контрольной и замерять на всех образцах, так как ее отклонения приводят затем к изменению изгибающего момента действующего на вал.

В силу того, что опасное сечение представляет собой кольцо с размерами Д и d мм (наружный и внутренний диаметры соответственно), вычисление моментов инерции J_i и сопротивления W_i данного сечения значительно упрощается.

В этом случае ввиду симметричности сечения $J_x=J_y$, следовательно,

$$J_x = J_y = \frac{J_p}{2}, \qquad (2.28)$$

где полярный момент инерции J_p равен:

$$J_p = \frac{\pi D^4}{32}\left(1-c^4\right), \qquad (2.29)$$

где $c = \frac{d}{D}$.

Таким образом, главные моменты инерции и моменты сопротивления в рассматриваемом случае имеют значения, определяемые следующими формулами:

$$J_x = J_y = \frac{\pi D^2}{64}\left(1 - c^4\right) \approx 0{,}05D^4(1 - c^4); \tag{2.30}$$

$$W_x = W_y \frac{\pi D^3}{32}\left(1 - c^4\right) \approx 0{,}1D^3\left(1 - c^4\right). \tag{2.31}$$

Для номинального размера шеек коленчатого вала ЗМЗ-53 с величиной наружного диаметра шатунных шеек Д=60,000 – 59,987мм и внутреннего диаметра d=28мм осевые моменты инерции и моменты сопротивления изгибу W_x, W_y опасного сечения равны:

$$J_x = J_y = \frac{3{,}14 \cdot 6{,}0^4}{64}[1 - (\frac{2{,}8}{6{,}0})^4] = \frac{3{,}14 \cdot 12{,}96}{64}\left(1 - \frac{61{,}5}{1296}\right) = 63{,}56 \cdot \frac{1235}{1296} = 60{,}6\ см^4$$

$$W_x = W_y = \frac{3{,}14 \cdot 6{,}0^3}{32}\left[1 - \left(\frac{2{,}8}{6{,}0}\right)^4\right] = \frac{3{,}14 \cdot 216 \cdot 1235}{32 \cdot 1296} = 20{,}2\ см^3$$

Для проверки правильности вычислений необходимо учесть, что наибольшее удаление крайних волокон от нейтральной оси для рассматриваемого сечения

$$y_{\max} = \frac{D}{2} = \frac{6{,}0}{2} = 3{,}0см\ ,$$

а также моменты инерции и сопротивления при изгибе связаны известным соотношением:

$$W = \frac{J}{y_{\max}}\ . \tag{2.32}$$

Отклонения наружного диаметра шеек до 0,05 мм не оказывает существенного влияния на величину осевых моментов инерции и сопротивления, поэтому при их определении использовалось верхнее значение поля допуска, регламентируемое техническими условиями. Ошибка при этом не превышала 0,1%.

Аналогично вычисляются геометрические характеристики опасных сечений у испытываемых коленчатых валов ремонтных размеров. На рисунке 2.17 показано расположение опасного сечения и в таблице 3.12, а приложения А приведены геометрические характеристики номинального и 5-го ремонтного размера (-1).

С целью сокращения объемы вычислений и времени обработки при получении геометрических характеристик опасных сечений возможно применение графического интерполирования по реальным размером испытываемых валов. Для этого необходимо построить вспомогательный график с осью абсцисс - реальные размеры валов, а по оси ординат – расчетные

значения геометрических характеристик, Его применение намного облегчает вычисления.

Амплитуда перемещений свободного конца вала, рассчитывается по ранее выведенной в работах [48, 64] формуле:

$$y = \frac{Q_r \rho_c \omega^2 l^2}{3gEJ_x - \left(Q_r - Q_g\right)\omega^2 l^3}. \qquad (2.33)$$

Расчетная сила нагружения $F_{ин}$ определяется по уточненной, также известной [12, 26, 48] формуле:

$$F_{ин} = \frac{\omega^2}{g}\left[Q_R \rho_c + \left(Q_r + Q_g\right)y\right]. \qquad (2.34)$$

В формулах (2.33) и (2.34) принято:

Q_r - вес дисбалансно установленного груза, кг;

Q_g - вес возбуждающего диска в сборе, равный 18,82кг;

ρ_c - радиус центра массы дисбаланса, см;

$\rho_c = f(Q_к)$ и колеблется от 131 до 142 мм

ω - угловая скорость, по величине определяемая выражением:

$$\omega = \frac{\pi n}{30} = 50\pi = 157\frac{1}{сек}, \qquad (2.35)$$

где g - ускорение силы тяжести, принимаемое = $980\frac{см}{сек^2}$;

EJ_x - жесткость опасного сечения при изгибе, $\frac{см}{сек^2}$.

Значение модуля упругости первого рода для магниевого высокопрочного чугуна принимается равным $E=1{,}4 \bullet 10^6 \frac{см}{сек^2}$.

l - расстояние до опасного сечения от плоскости действия изгибающей силы, см. рисунок 2.18.

Наряду с расчетным значениями величины амплитуды колебания свободного конца и силы инерции предусматривается их непосредственное измерение при работе машины. Амплитуда перемещения свободного конца измеряется вибрографом РВ-1, а сила инерции, нагружающая коленчатый вал, с помощью тензодатчиков сопротивления и принимаемой для этих целей серийной аппаратуры.

Как уже отмечалось, эпюры изгибающего и крутящего моментов не меняют своего характера и по форме остаются неизмененными.

Изменяется лишь значение ординаты в опасном сечении. На рисунке 2.18 построены эпюры указанных моментов от единичной силы. Чтобы получить

значение приведенного момента в необходимом сечении, нужно значение ординаты эпюры моментов от единичной силы в необходимом сечении умножить на величину силы нагружения [64].

Действующие напряжения определяются по известным формулам, причем расчет ведется по номинальном напряжениям. Особое внимание обращается на соблюдение условий проведения испытаний, которые изложены в работе [29]. Аналогично проводится математическая обработка результатов усталостных испытаний натурных коленчатых валов двигателя [56].

Пример испытаний на усталость образца коленчатого вала ЗМЗ-53 и результаты испытаний образца нового коленчатого вала ЗМЗ-53 (приложение В, изложены в протоколе испытаний). Образец изготовлен из заднего конца коленчатого вала, замаркирован индексом Н.З. и имеет размеры коренных шеек -69,98 мм, шатунных – 59,99мм, L=160мм. Испытания проводятся с целью установления величины предела выносливости новых коленчатых валов двигателя ЗМЗ-53.

Характеристики усталостного стенда конструкции КазНИПИАТ 64«Н» известны [65, 66]. При установке замерено плечо l_1 равное 35 мм.

Испытания велись при заданном дисбалансе грузов из восьми толстых пластин (по четыре с каждой стороны диска) плюс два болта с шайбами и гайками суммарным весом 2 кг.

Испытание закончилось разрушением коленчатого вала по расчетному опасному сечению за общее время наработки 4265 мин. По ранее приведены формулами определяем:

1. Плечо приложения нагрузки l_1 =125+35=160мм;

2. Суммарное число циклов, пройденное образцом

N=4265мин $\bullet 1500\ \frac{1}{мин}$=6,325 $\bullet 10^6$ циклов

3. Ожидаемый расчетный прогиб свободного конца коленчатого вала:

$$y = \frac{Q_r \rho_c \omega^2 \ell^3}{3gEJ_x - (Q_r - Q_g)\omega^2 \ell^3} = \frac{2.0 \bullet 14 \bullet 157^2 \bullet 16^3}{3 \bullet 980 \bullet 10^8 - 20{,}32 \bullet 24650 \bullet 4036} = 1{,}46 \bullet 10^{-2}\ см$$

$$или \quad y \approx 0{,}15 мм$$

4. Расчетное значение силы нагружения, действующей на свободной конец коленчатого вала:

$$F_{ин} = \frac{\omega^2}{g}\left[Q_r \rho_c + \left(Q_r + Q_g\right)y\right] = \frac{157^2}{980}\left[2{,}0 \bullet 14{,}0 + \left(2{,}0 + 18{,}82\right)0{,}015\right] = 776 кг$$

5. Приведенный момент от единичной силы

$$M' = \sqrt{16{,}0^2 + 4{,}0^2} = \sqrt{272} = 16{,}4\ кг \cdot см.$$

6. В сечении передней галтели этой же шатунной шейки

$$M_1' = \sqrt{10{,}8^2 + 4{,}0^2} = 11{,}5\ кг \cdot см.$$

7. Значение приведенного момента в опасном сечении

$$M_{пр} = 778 \bullet 16 = 12500 кг \bullet см.$$

8. Отсюда номинальное значение напряжения оказывается равным

$$\sigma = \frac{M_{пр}}{W_x} = \frac{12500}{20{,}2} = 6{,}2 \frac{кг}{мм^2}. \qquad (2.36)$$

Значения номинального напряжения и числа циклов до разрушения (а также базы испытаний, принятой за $10 \bullet 10^6$ циклов), заносятся в сводной протокол испытаний данной серии (см. приложение В). На основании сводных протоколов вычисляются пределы выносливости исследованных деталей, строятся графики кривых повреждаемости и вычисляются корреляционные уравнения кривых выносливости с последующим анализом долговечности испытанных серий.

При этом порядок статистической обработки полученных данных усталостных испытаний коленчатых валов ЗМЗ-53 принят следующий.

Из сводного протокола выписываются значения действующих напряжений и число циклов до разрушения испытанных образцов $(\sigma_i = x_i; N)$ и заносятся в таблицы 2.3…2.10 (см. приложение В). Вычисления в табличной форме при использовании метода наименьших квадратов рекомендуется литературой [65, 66], так как значительно сокращает время вычислений. В итоге вычислений коэффициентов $(a)\, u\, (b)$ кривой повреждаемости (кривой усталости) вида $y_1 = a + b(x_i - \bar{x})$ в полулогарифмических координатах получаем уравнение теоретической кривой усталости для наклонной части и также $\overline{x_{ср}}$, коэффициента вариации γ и дисперсии S вероятности границы для наклонной ветви кривой усталости.

Для определения прямолинейного участка кривой усталости и предела усталости σ_{-1} коленчатых валов по методу Л.М.Муратова используются таблицы 2.11…2.12 (см. приложение В). Среднеарифметические значение $\left(\overline{x_{ср}} = \sigma_{-1}\right)$ и есть предел выносливости испытанных деталей, а дисперсия S и коэффициент вариации γ позволяют определить вероятностные границы для прямолинейного участка кривой усталости.

Все эти вычисления затем приводятся в приложении В. На графике $\sigma - \lg N$ в полулогарифмических координатах наносятся точки реальных испытаний коленчатых валов ЗМЗ-53 согласно протоколам испытаний,

проводятся кривые усталости и их вероятные границы. В дальнейшем это позволяет оценить усталостную прочность испытанных серий коленчатых валов ЗМЗ-53 и провести сравнение их циклической прочности с новыми (эталонными) коленчатыми валами ЗМЗ-53.

2.6 Методика проведения эксплуатационных испытаний чугунных коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53 с восстановленными шейками.

Для восстановления коленчатых валов ЗМЗ-53 из магниевого высокопрочного чугуна с шаровидным графитом известно применение более 15 (пятнадцати) технологий, в том числе широкослойные, вибродуговое наплавки в различных защитных средах и др.

Каждый из них имеет свои технологические, технические, экономические преимущества и недостатки. Однако все они по результатам лабораторных испытаний на образцах долговечности, восстановленных указанными способами, в целом показали их недостаточную прочность и износостойкость в сравнении с новыми.

Тем не менее, эти способы продолжают широко применяться для реставрации коленчатых валов в РК, России и других странах СНГ. Отсутствие единой технологии восстановления коленчатых валов ЗМЗ-53 приводит к невозможности повторной реставрации и явной порче ремонтного фонда, что в итоге вызывает большие экономические потери. Поэтому есть налицо объективная необходимость оценки долговечности коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53, восстанавливаемых по существующим, наиболее распространенным и рекомендуемым к применению технологиям в Республике Казахстан, в эксплуатационных условиях, с тем, чтобы в дальнейшем рекомендовать единую технологию восстановления чугунных коленчатых валов [33].

Целью настоящих испытаний является определение в эксплуатационных условиях показателей долговечности коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53,восстановленных по технологиям ГОСНИТИ и КазНАУ, в паре со вкладышами.

Объектом исследования являются коленчатые валы двигателей ЗМЗ-53. Двигатели собирались согласно техническим условиям на капитальный ремонт. В них устанавливались экспериментальные коленчатые валы (новые и восстановленные по технологиям ГОСНИТИ и КазНАУ) и имеющие геометрические параметры, отвечающие требованиям технических условий и рабочего чертежа [67, 68].

При эксплуатационных испытаниях коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53 исследуются следующие параметры:

1. Износостойкость коренных и шатунных шеек коленчатых валов, восстановленных широкослойной наплавкой проволокой СВ15ГЮСТЦА с добавками в дугу смеси порошковых материалов по технологии КазНАУ.

2. Износостойкость коренных и шатунных шеек коленчатых валов ЗМЗ-53, восстановленных наплавкой по винтовой линии проволокой СВ15ГЮСТЦА по технологии ГосНИТИ.

3. Износостойкость коренных и шатунных шеек исследуемых серий коленчатых валов в сравнении с новыми, эталонными деталями (относительная износостойкость и сравнительная долговечность исследуемых коленчатых валов).

Эксплутационные испытания проводились в пять этапов:

1-й этап. Разработка методики проведения исследований и планов наблюдений.

2-й этап. Микрометраж исследуемых валов и сопрягаемых деталей (коренных и шатунных вкладышей, нижней головки шатуна и коренных опор блоков цилиндров);сборка экспериментальных двигателей; контроль сборки и их маркировка.

3-й этап. Организация наблюдений за экспериментальными двигателями в процессе проведения эксплуатационных испытаний. Промежуточный контроль износов коленчатых валов и вкладышей (микрометраж) в ходе испытаний.

4-й этап. Конечный микрометраж деталей экспериментальных двигателей при снятии их с эксплуатационных испытаний.

5-й этап. Обработка полученных первичных данных и составление заключений и выводов. Представление результатов эксплутационных испытаний.

Все этапы исследований базируются на ГОСТах, регламентирующих микрометраж деталей двигателей, а также планирование, систему сбора и обработки информации, планирование наблюдений при оценке надежности изделий машиностроения.

Обоснование минимального необходимого числа экспериментальных двигателей, основывается на ГОСТ 17510-82, который устанавливает систему сбора и обработки информации, а также планирование наблюдений при оценки надежности изделий машиностроения. При проведении эксплутационных испытаний коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53 руководствовались положениями ГОСТ 17510-82, который допускает проводить сбор информации о надежности, как для изделия в целом, так и для его составных частей.

Исходя из этого, представляется возможным построить планы наблюдений не только за коленчатыми валами в целом, но и в отдельности за коренными и шатунными шейками, так как закономерности их износов достаточно хорошо изучены и известны. Это позволяет значительно сократить число экспериментальных двигателей, и, следовательно, трудоемкость и продолжительность эксплутационных испытаний, что в итоге приводит к минимальным затратам при проведении данной работы.

Далее проводился расчет необходимого количество двигателей.

Учитывая рекомендации по определению минимального числа объектов наблюдения и принимая во внимание результаты работ КазНИПИАТа и др. устанавливающие, что износы шеек подчиняются закону распределения

Вейбулла (причем параметры распределения известны), определялось число объектов испытаний:

$$(\sigma+1)^b = \frac{2N}{x^2_{1-\beta;2N}},, \tag{2.37}$$

где σ- относительная ошибка среднего значения t^{cp} исследуемой случайной величины с доверительной вероятностью β, принимаемой в нашем случае равной 0,90, β=0,9. Относительная ошибка рассчитывалась по формуле:

$$\sigma = \frac{t_{\max} - t_{cp}}{t_{cp}}, \tag{2.38}$$

где $t_{\max}$- наибольшее отклонение исследуемой величины, приближенно принимаемое за верхнюю одностороннюю границу [65, 66].

b – параметр распределения Вейбулла (для экспоненциального закона b=1), связанный функциональной зависимостью с коэффициентом вариации V.

Коэффициент вариации определялся по известным формулам, как отношение среднеквадратичного отклонения - σ исследуемой случайной величины к ее среднему значению, b- параметр брался по таблицам 2 и 3 приложения В.

$\chi^2_{1-\beta;2N}$- критерий, отвечающий условию,

$$\rho\left(\chi^2 \le \chi_{1-\beta;2N}\right) = \int_0^{\chi_{1-\beta;2N}} f\left(x^2\right) d\chi^2 = 1-\beta; \tag{2.39}$$

который также определяется по таблицам ГОСТ.

При известных величинах:

- относительной ошибки среднего значения износов шеек коленчатого вала σ = 0,20…0,25;
- коэффициента вариации износов V=0.5…0.8;
- верхней односторонней доверительной вероятности:

$$P_\beta = P_{0.9}; \tag{2.40}$$

для получения достоверных данных по износостойкости реставрированных коленчатых валов (среднему сроку службы) минимальное необходимое количество испытуемых шеек должно быть равно:

$$V = 0.50; \quad (0{,}2+1{,}0)^{2{,}100} = \frac{2N}{\chi_{1-\beta;2N}}; \qquad 1{,}47 = \frac{2N}{\chi_{1-\beta;2N}} = \frac{28}{18{,}9}$$

при $b = 2{,}100; \qquad 2N = 28; \qquad N = 14.$

$$V = 0{,}80; \qquad (0{,}2+1{,}0)^{1{,}260} = \frac{2N}{\chi_{1-\beta;2N}}; \qquad 1{,}26 = \frac{2N}{\chi_{1-\beta;2N}} = \frac{75}{59{,}8}$$

$b = 1{,}260$

при $2N = 1{,}25 \bullet 59{,}8 = 75{,}4; \qquad 2N = 75; \qquad N = 38.$

Принимая N=38, для испытания коленчатых валов по каждой технологии восстановления необходимо испытание $К_{дв} = 38:13 \approx 3$ трех двигателей.

Частные методики исследования общего и специального характера, используемые при проведении настоящих эксплуатационных испытаний, приводятся ниже. Так как долговечность коленчатых валов оценивается износом шеек, величина которого не будет превышать в среднем 20 мкм, частные методики разработаны на:

- определение дефектов коленчатых валов и их геометрических параметров;
- микрометраж деталей экспериментальных двигателей согласно ГОСТ 14846-69;
- определение износов с помощью искусственных баз:

а) лунок нарезных прибором УПОИВ – 2;

в) вдавленных отпечатков.

Экспериментальные двигатели собирались в автобусных парках гАлматы.

После полного микрометража основных деталей собирается весь двигатель согласно техническим условиям. Перед укладкой вала производится динамическая балансировка его в сборе с маховиком. Собранный двигатель проходит обкатку по режимам, установленным на заводе для данной модели двигателя, после чего отправляется в автохозяйство.

Подготовка экспериментальных двигателей к эксплуатационным испытаниям осуществляется непосредственно в автохозяйстве и состоит из укомплектования всеми агрегатами необходимыми для обеспечения его работы в нормальных условиях эксплуатации. Особое внимание при подготовке двигателей должно обращаться на состояние системы смазки (в частности, масляного насоса, масляной магистрали и центрифуги)и системы охлаждения. Подготовка включает в себя также, оформление предусмотренной методикой документации на каждый экспериментальный двигатель и инструктаж водителей с напоминанием о том, что в случае любого отказа экспериментального двигателя разборка его и устранение дефекта должна производится в присутствии представителя КазНАУ.

Исходя из требований ГОСТ 17510-82, выбор автохозяйства и места проведения эксплуатационных испытаний производился из того, чтобы все автомашины обеспечивались одинаковыми условиями эксплуатации. С целью получения сопоставимых результатов предусматривалась работа автомобилей с экспериментальными двигателями на равнозначных маршрутах перевозки.

Смена масла, фильтрующих элементов, очистка ротора центрифуги и техническое обслуживание двигателя производились через периоды времени, соответствующие пробегу по инструкции завода-изготовителя. В ходе эксплуатационных испытаний регистрировались все замеченные неполадки и отказы деталей двигателей. При пробеге 55 - 60 тыс.км планировалось проведение промежуточного замера износа вала и вкладышей. Промежуточный микрометраж приурочивался к очередному ТО (техническому осмотру).

Эксплуатационные испытания двигателей с восстановленными коленчатыми валами проводились при постоянном наблюдении (согласно ГОСТ 17510-82),так как, во-первых, испытывались образцы новой техники, и, во-вторых, определялись основные показатели надежности изделий мелкосерийного и индивидуального производства.

Этим же стандартом предусматривается несколько планов проведения наблюдений, из которых были приняты:

а) для коленчатого вала в целом, шатунных и коренных шеек- план (N,U,N), который трактуется следующим образом: на испытание поставлено N изделий; наблюдения ведутся до возникновения отказа и предельного состояния (наибольшего износа), всех изделий. Отказавшие изделия не ремонтируются и не заменяются новыми.

б) для сопрягаемых с коленчатых валом деталей и цилиндр - поршневой группы :-план (N,R,T)-то есть наблюдения проводятся в течении времени T, а отказавшие изделия заменяются новыми или ремонтируются. Результаты наблюдений за отремонтированными изделиями включаются в общие данные наблюдений до замены.

Вышеприведенные планы наблюдений заложены в методику эксплуатационных испытаний и находят отражение в частной методике по организации наблюдений за экспериментальными двигателями.

Эксплуатационные испытания экспериментальных двигателей проводились в автобусных парках.

Наблюдение за экспериментальными двигателями осуществлялось согласно таблице 3.11, главы 3, где учитывается:

- государственный и парковый номер автомобиля;
- номер двигателя и литейный номер блока;
- даты установки и снятия двигателя;
- показания счетчика в момент установки и снятия двигателя;
- учет дефектов и неисправностей двигателя и мероприятий по их устранению.

В процессе эксплуатации не допускается обезличивание экспериментальных двигателей. Учет пробега автомобилей с экспериментальными двигателями осуществляется по путевым листам по

показаниям спидометров. Через каждые 30 тыс. км (по спидометру) автохозяйство снимает автобус с экспериментальными двигателем с линии, для проведения замеров шатунных и коренных шеек коленчатого вала, и сопрягаемых с ними вкладышей. В случае вынужденной разборки двигателя после 10 тыс. км пробега автомобиля снова проводятся аналогичные замеры. Осуществление замеров и определение износов шеек коленчатых валов осуществляется согласно методике, изложенной в данной главе. Замена вкладышей коренных и шатунных подшипников производилась под наблюдением работника КазНАУ.

В случае выхода двигателя из строя, на снятый двигатель прикреплялась бирка, на которой указывались:

- дата снятия двигателя;
- показания спидометра в момент выхода;
- номер акта и дата его составления.

Выводы

1. В результате выполненных исследований, анализа литературных источников и опыта ремонтных предприятий обоснованы и выбраны с учётом технологических и металлургических факторов, способ восстановления изношенных шеек чугунных коленчатых валов электродуговой наплавкой.

Проведены прочностные испытания наплавленных шеек. Предложены новые составы шихтового материала, выбраны рациональные режимы наплавки, обеспечивающие качество наплавленного слоя, проверенные инструментальным методом.

2. Приведены теоретические основы износа в парах трения коленчатых валов и изложена методика экспериментального определения износа наплавленных шеек валов.

Основные параметры износостойкости – интенсивность износа (линейного, объёмного, массового), удельная работа изнашивания; критическая плотность энергии деформации; критерий критической плотности внутренней энергии и др., позволяют подойти к анализу износа в соответствии с предложенными расчётными формулами.

3. Приведены также теоретические основы усталостной прочности чугунных коленчатых валов и изложены методики:

а) проведения испытаний на усталостную прочность чугунных коленчатых валов, с восстановленными наплавкой шейками;

б) проведения эксплуатационных испытаний – двигателей с чугунными коленчатыми валами, с восстановленными наплавкой шейками.

Глава III Экспериментальные исследования по наплавке шеек чугунных коленчатых валов и оценка их износостойкости, усталости и долговечности.

3.1 Технологический процесс восстановления коленчатого вала двигателя ЗМЗ-53

Восстановление изношенных деталей – сложный организационно-технологический процесс, при котором в отличие от производства новых деталей в качестве заготовки используют сформированную, но уже изношенную деталь. Притом, при восстановлении изношенных деталей появляется ряд дополнительных операций: разборка, мойка, дефектация и другие операции, которые следует учитывать и оценивать затраты на них при выборе способа.

По данным исследований Е.Л.Воловика износ различных групп деталей автотракторной и сельскохозяйственной техники находится в пределах 0,1 ÷ 10 мм. При этом около 83 % деталей имеют износ до 0,6 мм. Износ поверхности деталей распределяется примерно так:

- цилиндрических – 52 %;
- трещин и изломов – 9 %;
- нарушение геометрической формы 13 % от их общего числа.

Способы восстановления деталей условно делятся на две группы: с износом не более 0,6 мм и с износом более 0,6 мм.

Согласно классификации восстанавливаемых деталей тракторов и автомобилей по конструктивно-технологическим признакам [53], распределительные и коленчатые валы относятся к IV группе с износом 0,6 ÷ 2 мм. К ним применяют наплавку под слоем флюса порошковой проволокой в среде углекислого газа вибродуговую, плазменную, осталивание и др.

Рациональная разработка технологических процессов восстановления конкретных деталей определяется, главным образом, выбором способа, обеспечивающего наибольшую долговечность детали при наименьших затратах на их восстановление. В настоящее время ремонтные предприятия располагают значительным количеством способов восстановления деталей, которые применяют для устранения многих дефектов – износов, механических повреждений, трещин и др. Для восстановления одной и той же детали пригодны несколько способов, часто равноценных по своим технико-экономическим показателям. Поэтому, обоснование выбора оптимального способа восстановления детали или группы деталей является важной и сложной задачей, которую следует решать в комплексе технических, организационных и экономических вопросов.

Выбору способа восстановления деталей посвящены работы В.И. Казерцева, В.А. Шадричева, М.А. Масино, И.С. Левитского, В.М. Кряжкова, В.Л. Воловика, В.И. Черноиванова и других [69, 70, 71, 72, 73].

Для выбора рационального способа применительно к восстановлению конкретной детали следует знать технологические возможности различных

способов нанесения покрытий на изношенные поверхности, их характерные особенности. В настоящее время известно несколько наиболее широко применяемых способов, такие как, наплавка под слоем флюса; наплавка порошковыми проволоками; вибродуговая наплавка; наплавка в среде защитных газов; электроконтактная приварка; гальванические покрытия и др. [41, 71, 18].

Для наплавки под слоем флюса, характерны высокая производительность (за счёт применения больших плотностей тока); возможность получения слоёв с необходимыми физико-механическими свойствами благодаря широкому легированию наплавленного металла; возможность получения наплавленных слоёв толщиной 0,8 – 10 мм.

К недостаткам относятся: высокий нагрев, восстанавливаемой детали и значительное перемешивание основного и присадочного металлов; невозможность выполнять наплавки на детали диаметром менее 45 мм; необходимость ручного удаления шлаковой корки.

В качестве присадочных материалов применяют высокоуглеродистую проволоку, порошковую проволоку или ленту. Способ применяют для восстановления деталей с износом более 0,6 мм. [74, 75].

На рисунке 3.1 изображена схема наплавки под слоем флюса, на рисунке 3.2 – технологические параметры наплавки.

Ниже приводятся технико-экономические показатели наплавки под слоем флюса валов, работающих в паре с подшипниками скольжения:

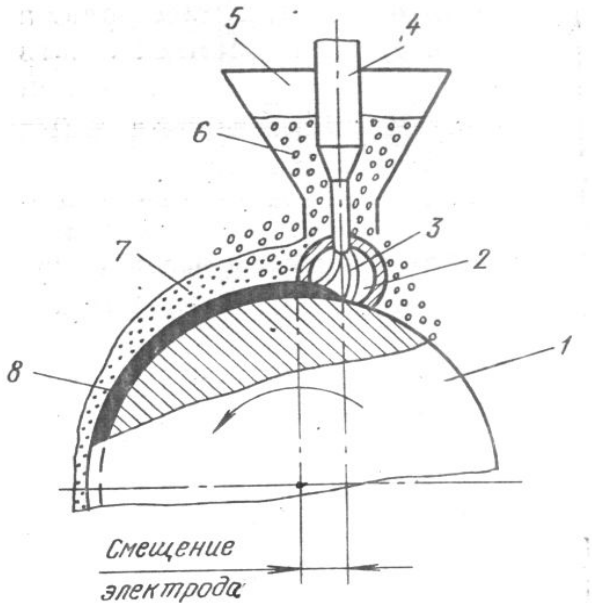
- производительность – 2-15 кг/ч; (16-24 $см^3$/мин);
- толщина наплавляемого покрытия – 0,8-10 мм;
- припуск на механическую обработку – 0,8-15 мм;
- доля основного металла в наплавленном слое – 27-60 %;
- прочность сцепления – 659 МПа;
- минимальный диаметр детали – 45 мм;
- снижение сопротивления усталости – 15 %;
- деформация детали после наплавки – значительная.

Технологический процесс восстановления коленчатых валов, работающих в условиях повторнопеременных динамических нагрузок и гидроабразивного износа, должен обеспечить сопротивление усталостному разрушению и износостойкость на уровне новых деталей [66]. Для восстановления таких деталей в данной работе разработан технологический процесс восстановления коленчатого вала, сущность которого заключается в следующем:

- коленчатый вал с предварительно зачищенными от ржавчины шейками и очищенными грязеуловителями, помешают для мойки на 15-20 мин. в раствор каустической соды при 65-70 ^{0}C;

- затем визуально ведут дефектоскопию на наличие отколов, поломок фланца и резьбовых отверстий, трещин, прогиба вала, отклонения радиуса кривошипа и прочее;

- подлежащий восстановлению вал нагревают в термической печи до 350-400^{0}С и в течение 2-х часов выжигают смазочный материал;



1 – вал; 2 – мундштук; 3 – дуга; 4 – электрод; 5 – воронка; 6 – флюс; 7 – расплав флюса (корка); 8 – наплавленный слой

Рисунок 3.1 Схема установки автоматической наплавки под слоем флюса.

.

- на круглошлифовальном станке шлифуют шейки до удаления следов износа;

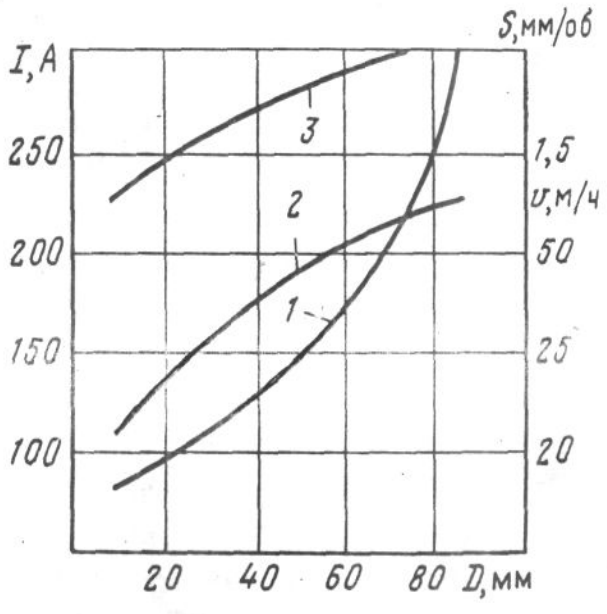


Рисунок 3.2 График зависимостей (1-3) силы тока I, скорости υ и шага наплавки соответственно от диаметра D детали.

- отверстия маслоподводящих каналов забивают графитовыми стержнями;

- вал устанавливают на станок У-653, модернизированный для выполнения широкослойной наплавки, (рисунок 3.4). Наращивание компенсирующего износ слоя металла ведут на шатунных шейках, начиная с первой, при этом в сварочную ванну подают шихту в виде порошковой композиции компонентов по массе %:

- графит (ГЛ-2) – 10-13 %;
- алюминий (АП-4) – 6-7%;
- железа (ПЖ-4М) – 80-84%.

Режимы широкослойной наплавки:

1) напряжение на дуге, 20-22 В;
2) сила тока на дуге, 180-200 А;
3) число оборотов наплавляемой детали, 1,5 об/мин;
4) марка сварочной проволоки – 15-ГСТЮЦА;
5) диаметр сварочной проволоки – 1,6 мм;
6) скорость подачи сварочной проволоки – 3,1 м/мин;
7) число колебаний сварочной головки – 36 ед/мин;
8) расход порошковой композиции – 36 г/мин;
9) источник питания ВС-600М ток постоянный, обратной полярности.

- для устранения деформации осуществляют правку вала на 40 тн. гидравлическом прессе с фиксированием выгибания в противоположную сторону индикаторной головкой (рисунок 3.3).

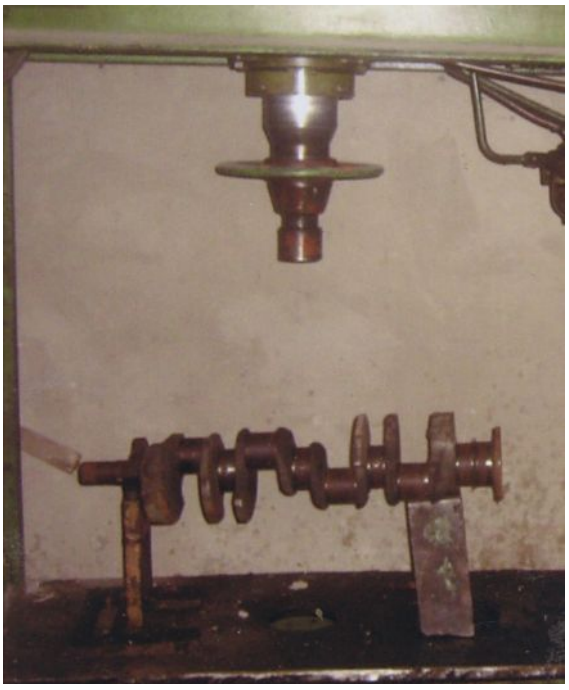


Рисунок 3.3 Гидравлической пресс для правки валов.

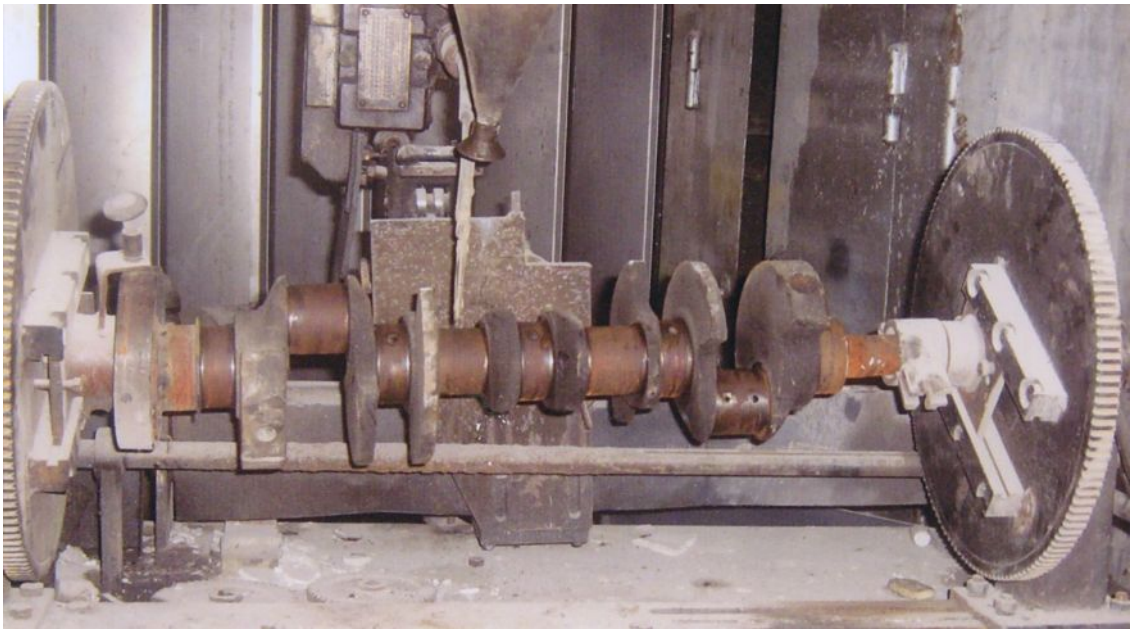


Рисунок 3.4 – Наплавочная установка У-653.

- после правки наплавляют, начиная с первой, коренные шейки вала на режимах, указанных выше;

- осуществляют черновое шлифование наплавленных шеек на станке 3А-423;

-восстанавливают маслоподводящие каналы высверливанием графитовых стержней и зенкованием фасок, производят чистовую шлифовку на чертежный размер вначале шатунных, затем коренных шеек;

-кромки нанесенного на шейки слоя металла зачищают, а операции завершают балансировкой вала на балансировочной машине КИ – 7274, устраняя дисбаланс коленчатого вала вместе с маховиком и корзиной сцепления, грузом 60 г/см .

Предлагаемая технология, рисунок 3.5, позволяет восстановленному коленчатому валу удовлетворять условию равной износостойкости по сравнению с эталонным коленчатым валом.

За 3 года эксплуатационных испытаний не поступило ни одной рекламации на восстановленные коленчатые валы, причем пробег автомобилей составил от 36,9 до 73,0 тыс. км при нормативном послеремонтном ресурсе ЗМЗ-53 [66].

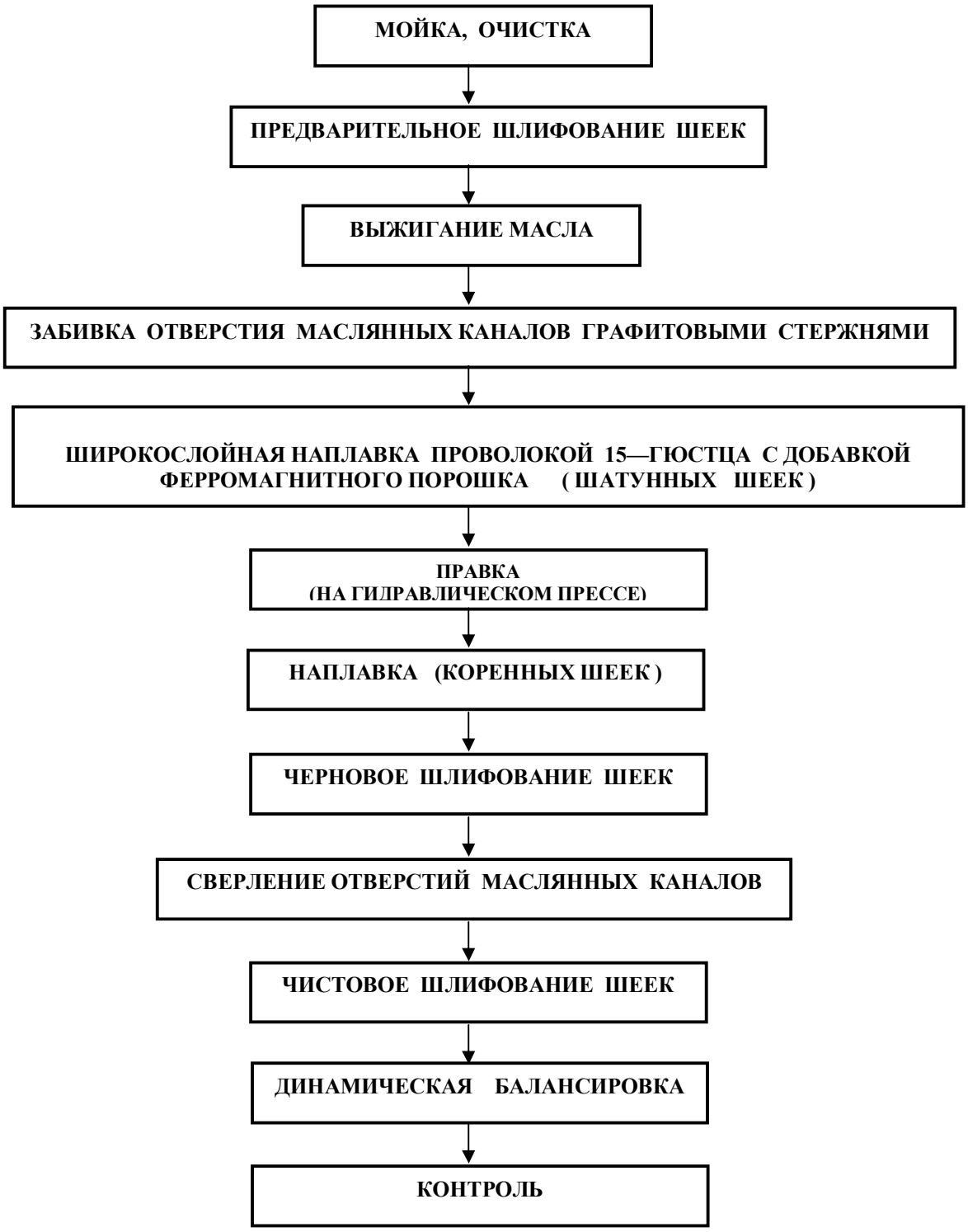


Рисунок 3.5 – Технологический процесс восстановления коленчатого вала.

3.2 Исследования физико-механических свойств наплавленного слоя шеек чугунных коленчатых валов.

Для исследования физико-механических свойств наплавленных шеек чугунных коленчатых валов нами изготовлены шесть образцов изделий с наплавленными шейками и проведена их комплексная проверка микроструктуры наплавленного металла и его прочностные характеристики.

Ниже приводятся результаты металлографических исследований структуры наплавленного слоя и переходной зоны к основному металлу шеек восстановленных валов.

Образец «1». В результате визуального осмотра пор, трещин и других дефектов в наплавленном металле не обнаружено. Толщина наплавленного слоя 4,4-4,5мм. Микроструктура наплавленного металла состоит из среднеигольчатого мартенсита и легированного феррита, выделившегося по границам первичных аустенитных зерен в период кристаллизации «ванны» наплавленного металла. Микроструктура наплавленного металла образца «1» представлена на рисунке 3.7(а), (увеличение х300). Величина действительного зерна микроструктуры наплавленного металла соответствует баллу 6 ГОСТ 5639-82.

Ближе к границе сплавления величина действительного зерна в наплавленном металле возрастает до 5-го и даже 4-го балла по ГОСТ 5639-82, что свидетельствует о том, что металл на этом участке длительное время сохранял температуру, превышающую температуру интенсивного роста зерна аустенита. На рисунке 3.7(б), (х300) приведена микрофотография зоны сплавления: слева – микроструктура наплавленного металла (мелкоигольчатый мартенсит + легированный феррит), справа – околошовная зона или зона сплавления основного металла, представляющая собой доэвтектический ледебурит (иглы цементита и небольшие участки мелкодисперсного перлита). Отбел чугуна (или образование структуры ледебурит) произошел на глубину 0,2-0,25мм. По мере удаления от границы сплавления, количество цементита в структуре основного металла постепенно уменьшается. На рисунке 3.7(в) приведена фотография микроструктуры основного металла шейки на глубине 0,5мм от границы сплавления. На фоне мелкодисперсного закаленного перлита расположены небольшие участки цементита (светлые участки на сером фоне) [33, 77, 78, 79].

На расстоянии 1,0-1,5мм от границы сплавления структура основного металла состоит из перлита+ феррит+ шаровидный графит, рисунок 3.6.

Результаты измерения микротвердости наплавленного металла и основного металла в околошовной зоне и зоне термического влияния образца «1» приведены в таблице 3.1 (см. приложение Б) и на рисунке 3.13 в виде кривой 1. Микротвердость отдельных структурных составляющих наплавленного металла находится в пределах 5200-6150 МПа (55-57 HRC). Микротвердость основного металла уменьшается от границы сплавления вглубь образца от 5740 МПа (структура ледебурита) до 2380 МПа (металлическая основа зернистый перлит +феррит).

Вывод: Качество металла образца «1» удовлетворительное. Основные параметры наплавки (сила тока, напряжение и т.д.) имеют оптимальные значения.

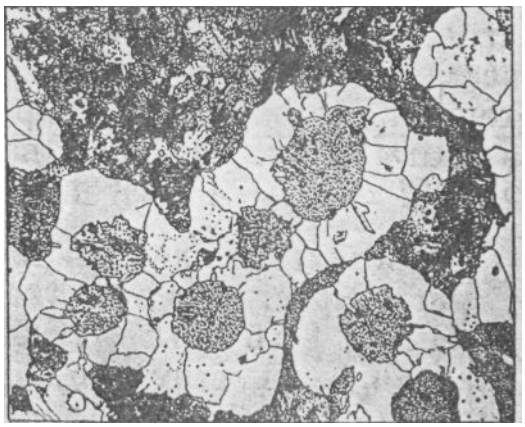


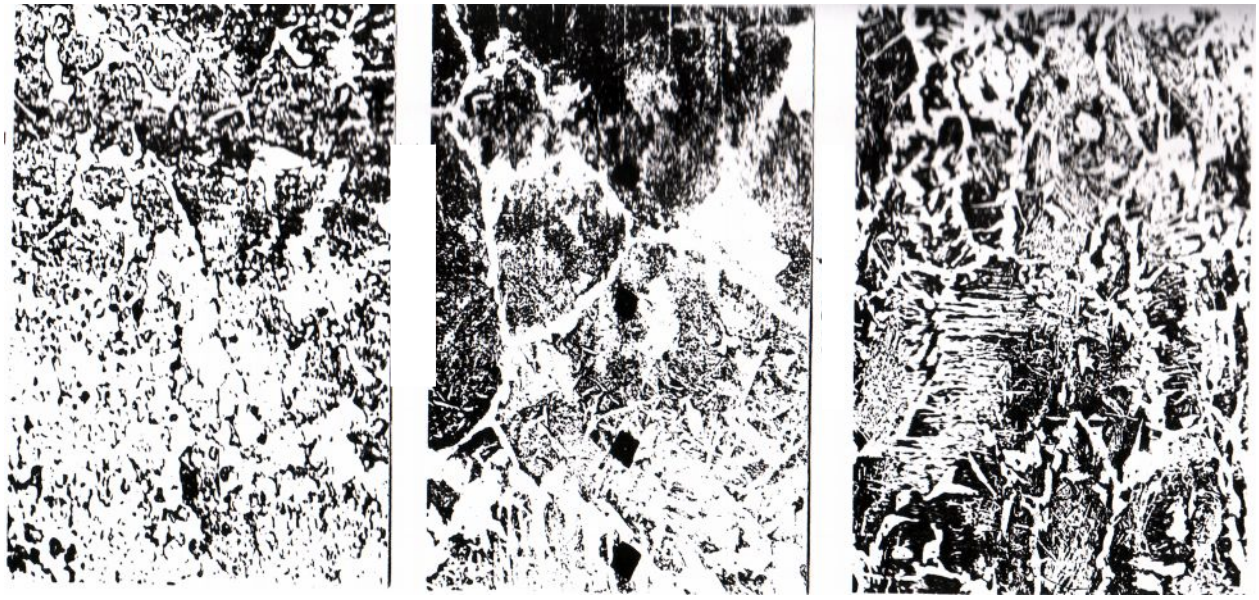
Рисунок 3.6 Микроструктура высокопрочного чугуна х250 (графит+феррит+перлит).

Образец «2». В результате визуального осмотра трещин, пор и других дефектов в наплавленном металле необнаружено. Толщина наплавленного металла 3,95-4,0мм.

Микроструктура наплавленного металла состоит из крупноигольчатого мартенсита и легированного феррита, рисунок 3.8(а), (х300). Величина соответствует 4-5 баллу ГОСТ 5639-82, что значительно выше, чем у металла коренной шейки. На рисунке 3.8(б) приведена фотография микроструктуры зоны сплавления: слева – микроструктура наплавленного металла (среднеигольчатый мартенсит + легированный феррит), справа – околошовная зона основного металла основного металла (эвтектический ледебурит).Отбел чугуна в околошовной зоне произошел на глубину 0,3-0,4мм. Цементитные включения, более крупные, чем в образце «1», встречаются на расстоянии 0,6-0,7мм, рисунок-3.8 (в), (пластинчатый перлит + феррит + цементит). На расстоянии 1,0-0,7мм от границы сплавления структура основного металла: феррит + перлит + шаровидный графит.

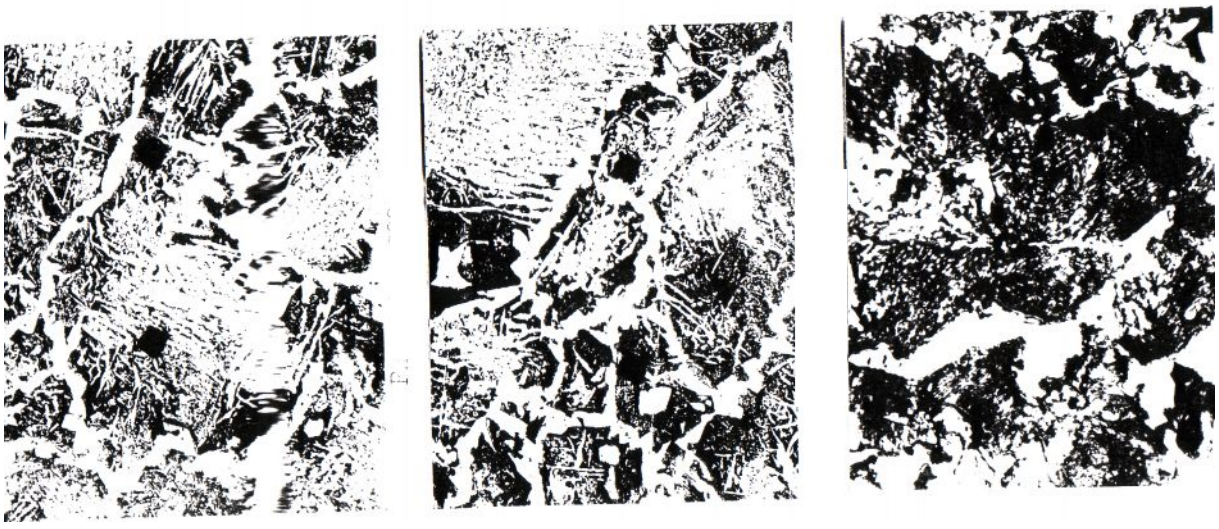
На рисунке 3.14 в виде кривой 2 приведены результаты измерения микротвердости наплавленного металла и основного металла в околошовной зоне термического влияния образца «2» по данным таблицы 3.2 (см. приложение Б). Микротвердость отдельных структурных составляющих наплавленного металла находится в пределах 4590-5370 МПа (45-47 HRC). Микротвердость основного металла уменьшается от границы сплавления вглубь образца от 5040 МПа (структура ледебурита) до 3440 МПа (перлит).

Вывод: Наличие отбела в околошовной зоне основного металла на значительной глубине до 0,4мм; грубая игольчатая структура наплавленного металла; величина действительного зерна на уровне 4-5 балла ГОСТ 5639-82 свидетельствуют о некотором перегреве металла в процессе наплавки. Необходимо изменить основные параметры наплавки с целью уменьшения погонной энергии.



а) б) в)
х 300 х 300 х 300
наплавленный слой переходная зона зона оснавного металла

Рисунок 3.7 Микроструктура наплавленного металла
(образец «1», коренная шейка, 15 ГЮСТЦА +порошок)



а) б) в)
х 300 х 300 х 300
наплавленный слой переходная зона зона оснавного металла

Рисунок 3.8 Микроструктура наплавленного металла
(образец «2», шатунная шейка, 15 ГСТЮЦА + порошок)

Образец «3». В результате визуального осмотра обнаружены трещины в наплавленном металле. Толщина наплавленного слоя 5,3-5,4мм.

Микроструктура наплавленного металла представляет собой мелкозернистый перлит + небольшое количество феррита (около 3% от обозреваемого поля шлифа), рисунок 3.9 (а). Очень слабо прослеживаются границы первичных аустенитных зерен (в виде нитевидных темных оторочек). Ближе к границе сплавления, структура приобретает игольчатый характер (бейнит).

Микротвердость наплавленного металла составляет 2860-3530 МПа (32-34 HRC),ближе к границе сплавления микротвердость несколько повышается и достигает значений 3730-4170 МПа. Видимо, только в слое наплавленного металла, прилегающей к границе сплавления, произошла диффузия углерода из чугуна. В околошовной зоне основного металла имеются лишь отдельные, не связанные между собой участки со структурой ледебурит. На рисунке 3.9(б) приведена фотография микроструктуры зоны сплавления: слева – микроструктура наплавленного металла (бейнит), справа небольшие участки доэвтектического ледебурита (иглы цементита + мелкодисперсный перлит). Результаты измерения микротвердости металла образца «3» приведены в таблице 3.3 (см. приложения Б) и на рисунке 3.14, кривая 3. Микроструктура основного металла: перлит +феррит + шаровидный графит.

Отличительной особенностью наплавленного металла образца «3»является наличие, так называемых непрореагировавших частиц, т.е. погонная энергия в процессе наплавки была недостаточной для их проплавления рисунок 3.9(в).

Вывод: Отсутствие ферритных отторочек по границам первичных аустенитных зерен, наличие «непрореагировавшых» частиц в наплавленном металле, минимальный отбел в околошовной зоне, недостаточная диффузия углерода из основного металла в наплавленный (о чем свидетельствуют результаты измерения микротвердости – микротвердость очень низкая)- все эти факторы свидетельствуют о недостаточной величине погонной энергии при наплавке, и как следствие образование «холодных» трещин в наплавленном металле.

Образец «4». В результате визуального осмотра обнаружены трещины в наплавленном металле. Толщина наплавленного слоя 4,1- 4,2мм.

Величина действительного зерна микроструктуры наплавленного металла соответствует 6-7 баллу ГОСТ 5639-82. Микроструктура наплавленного металла состоит из мелкодисперсного перлита, троостита и феррита как в виде отдельных участков, так в виде отторочек по границам первичных аустенитных зерен рисунок 3.10(а). Микротвердость наплавленного металла находится в пределах 3830-4430 МПа (40-42 HRC). По мере приближения к границе сплавления, ферритные оторочки исчезают, структурные составляющие сфероидезируются, наблюдается снижение их твёрдости от 3830 до 3530 МПа (таблица 3.4 см. приложение Б), рисунок 3.13, кривая 4.

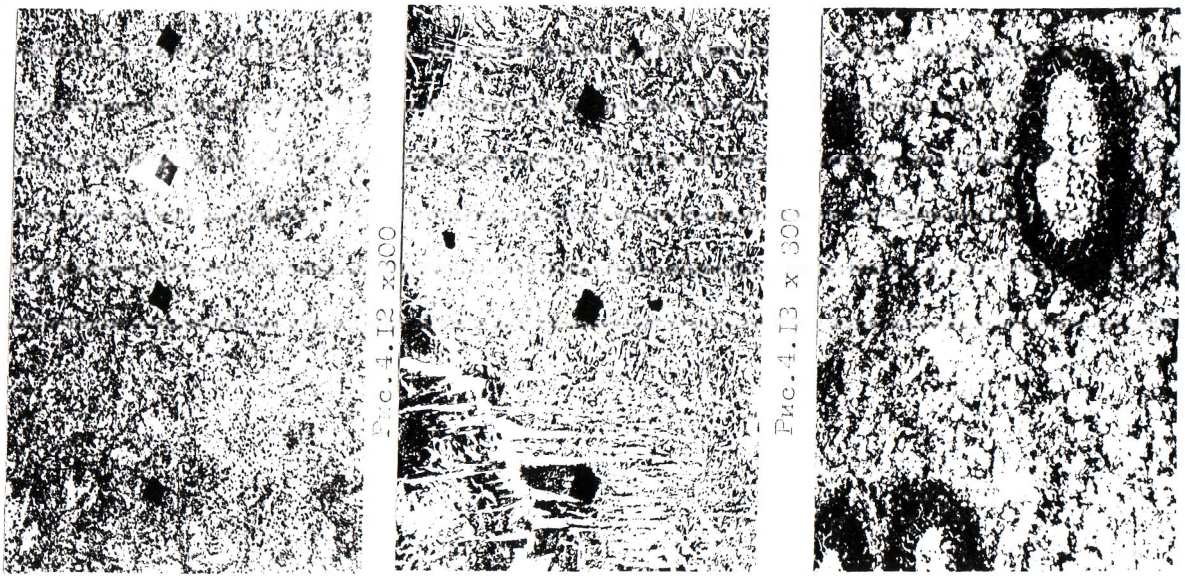
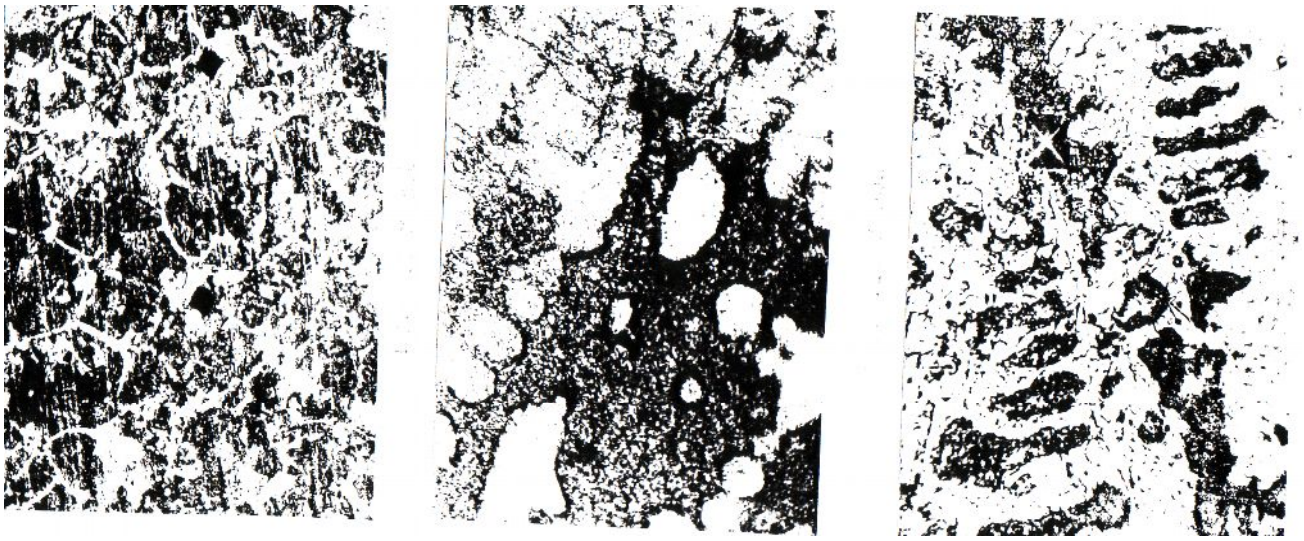


Рисунок 3.9 Образец «3», шатунная шейка, 15 ГСТЮЦА винтовая наплавка



а) х300 наплавленный слой

б) х300 переходная зона

в) х300 зона основного металла

Рисунок 3.10 Микроструктура наплавленного металла (образец «4», коренная шейка, винтовая наплавка)

На рисунке 3.10(б) приведена фотография микроструктура зоны сплавления: наплавленный металл-зернистый перлит.

Отбел чугуна произошел на глубину до 1,0 мм от границы сплавления. На рисунке 3.10(в) приведена фотография белого доэвтектического чугуна в околошовной зоне образца «4» (х300).

Вывод: низкая микротвердость наплавленного металла и значительный отбел в основном металле чугунного коленчатого вала вызваны значительным превышением погонной энергии сварки, в результате чего произошло выгорание углерода из наплавленного металла и значительный перегрев основного металла.

Образец «5». В результате визуального осмотра установлено, что в наплавленном металле имеются единичные поры. Трещин и других дефектов наплавки не обнаружено. Толщина наплавленного металла 2,7-2,8мм.

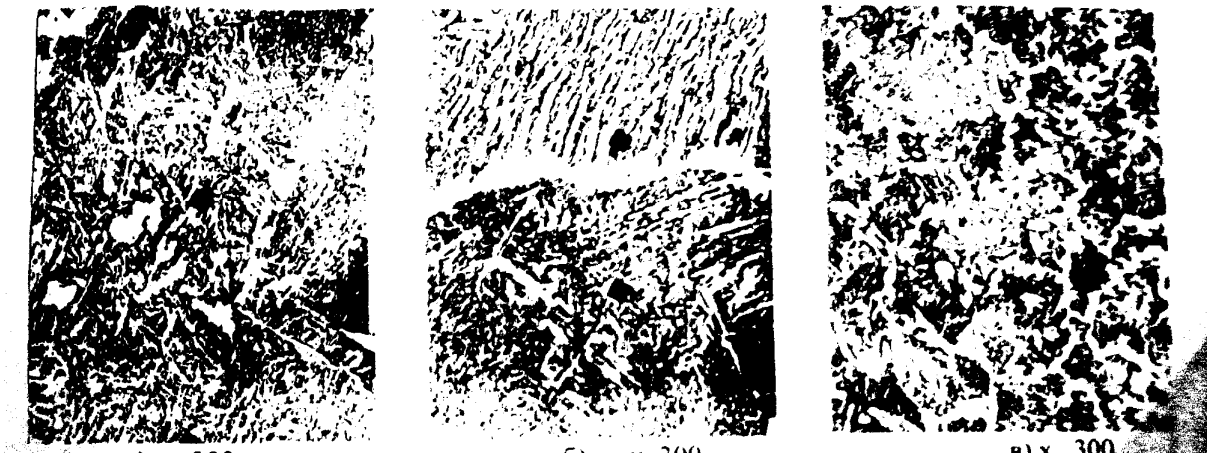
Микроструктура наплавленного металла состоит из среднеигольчатого мартенсита и цементита, рисунок 3.11(а) (х300). Микротвердость наплавленного металла 5550-6360 МПа или 57-60HRC рисунок 3.14 кривая 5 (таблица 3.5, см. приложение Б). На рисунке 3.11(б) приведена фотография зоны сплавления: слева – наплавленный металл (крупноигольчатый мартенсит + цементит), справа – основной металл (доэвтектический ледебурит). Отбел основного металла произошел на глубину около 0,8мм от границы сплавления, включения цементита располагаются на глубине до 2,5мм. Микротвердость основного металла в околошовной зоне 5370-6260 МПа.

Вывод: Качество наплавленного металла удовлетворительное однако высокая температура плавления сплава типа «Сормаит» требует для обеспечения необходимого качества наплавленного слоя, применения высоких значений погонной энергии наплавки. При этом наблюдается значительное тепловое воздействие на основной металл коленчатого вала, что приводит к образованию структуры ледебурита на значительную глубину, в нашем случае на глубину до 3,0мм. Наличие в структуре основного металла такого концентратора напряжений обычно значительно снижает послеремонтный ресурс восстановленного коленчатого вала.

Образец «6». В результате визуального осмотра установлено, что пор, трещин и других дефектов наплавки не обнаружено. Толщина наплавленного слоя 4,1-4,2 мм [33, 77, 78, 79].

Величина действительного зерна микроструктуры наплавленного металла соответствует 6-7 баллу ГОСТ 5639-82. Микроструктура наплавленного металла представляет собой мелькоигольчатый мартенсит + феррит, в основном в виде отторочек по границам первичных аустенитных зерен, рисунок 3.12. Микротвердость наплавленного металла 4590-5370 МПа или 47-48HRC кривая 6 (таблица 3.6, см. приложения Б). Отбел основного металла произошел на глубину до 1,0 мм. Микротвердость основного металла в околошовной зоне имеет значения от 5740 МПа (структура-ледебурит) до 2240 МПа (перлит + феррит + шаровидный графит).

Вывод: см. – Образец «5».

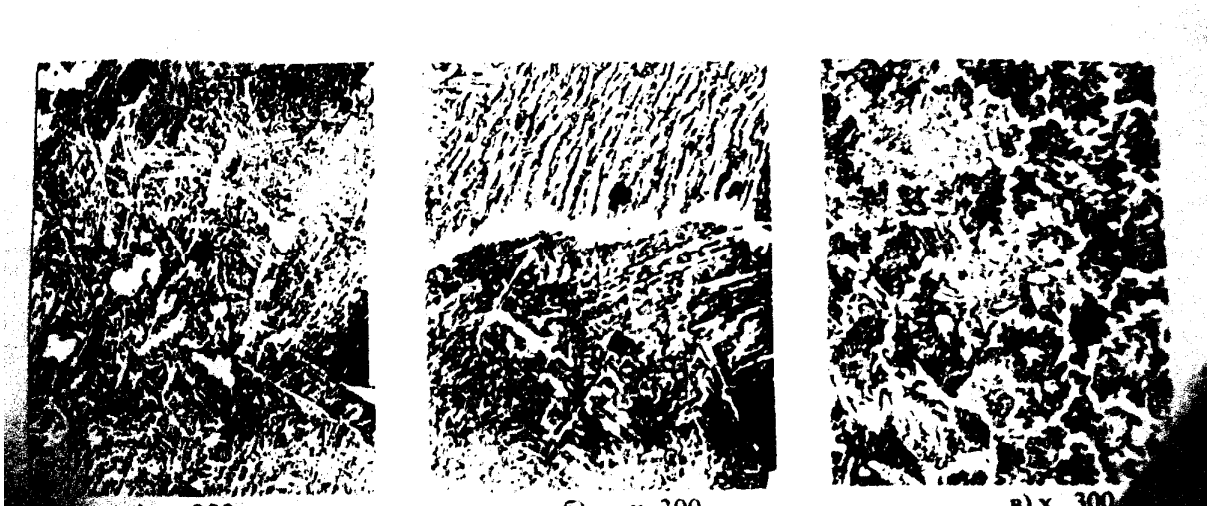


а) х300
наплавленный слой

б) х300
переходная зона

в) х300
зона основного металла

Рисунок 3.11 Микроструктура наплавленного металла
(образец «5», шатунная шейка, 15 ГСТЮЦА + СОРМАИТ)



а) х300
наплавленный слой

б) х300
переходная зона

в) х300
зона основного металла

Рисунок 3.12 Микроструктура наплавленного металла
(образец «6», шатунная шейка, 15 ГСТЮЦА + СОРМАИТ)

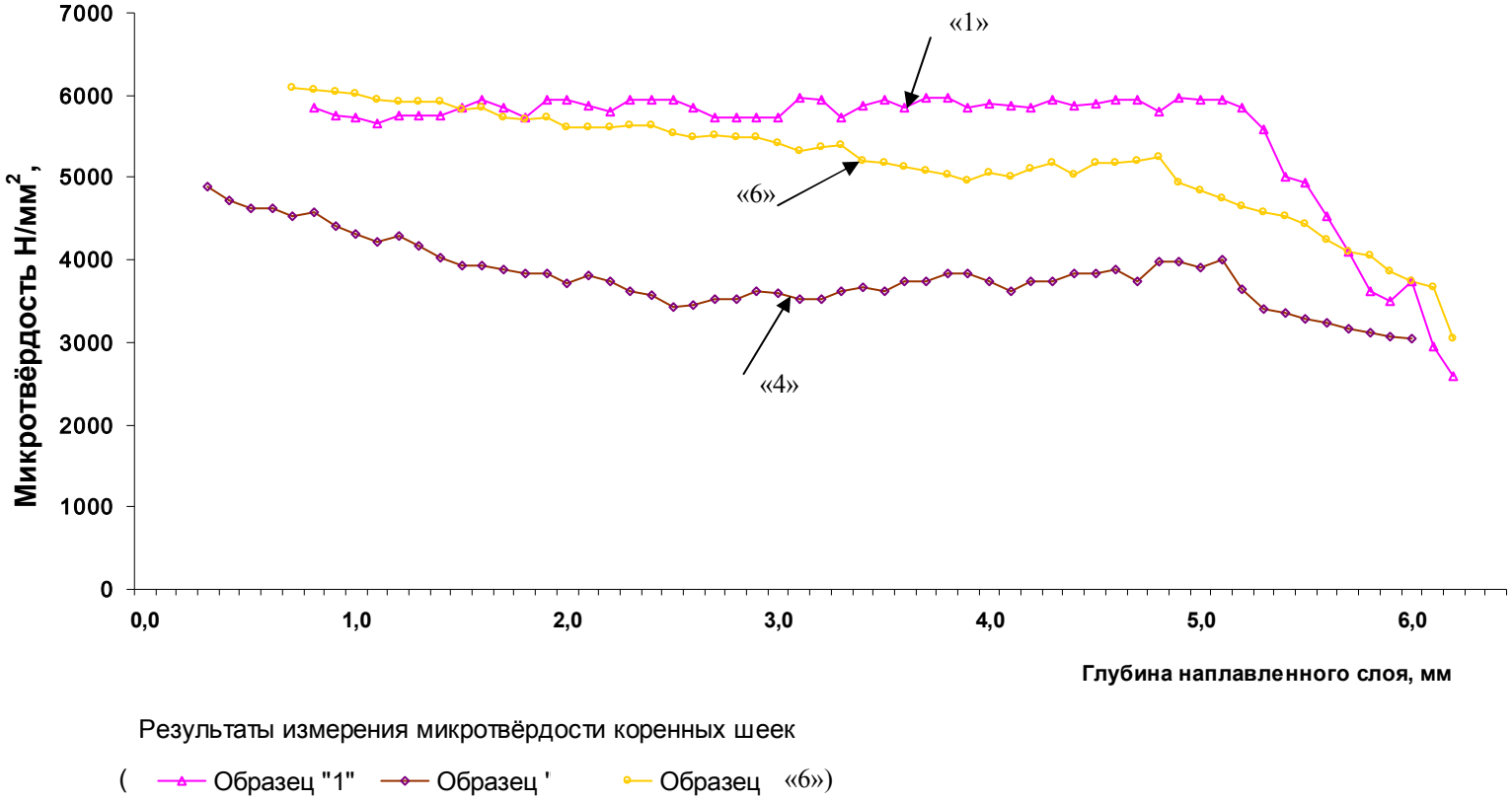


Рисунок 3.13 – Графики зависимости микротвёрдости коренных шеек коленчатых валов от глубины наплавленного слоя.

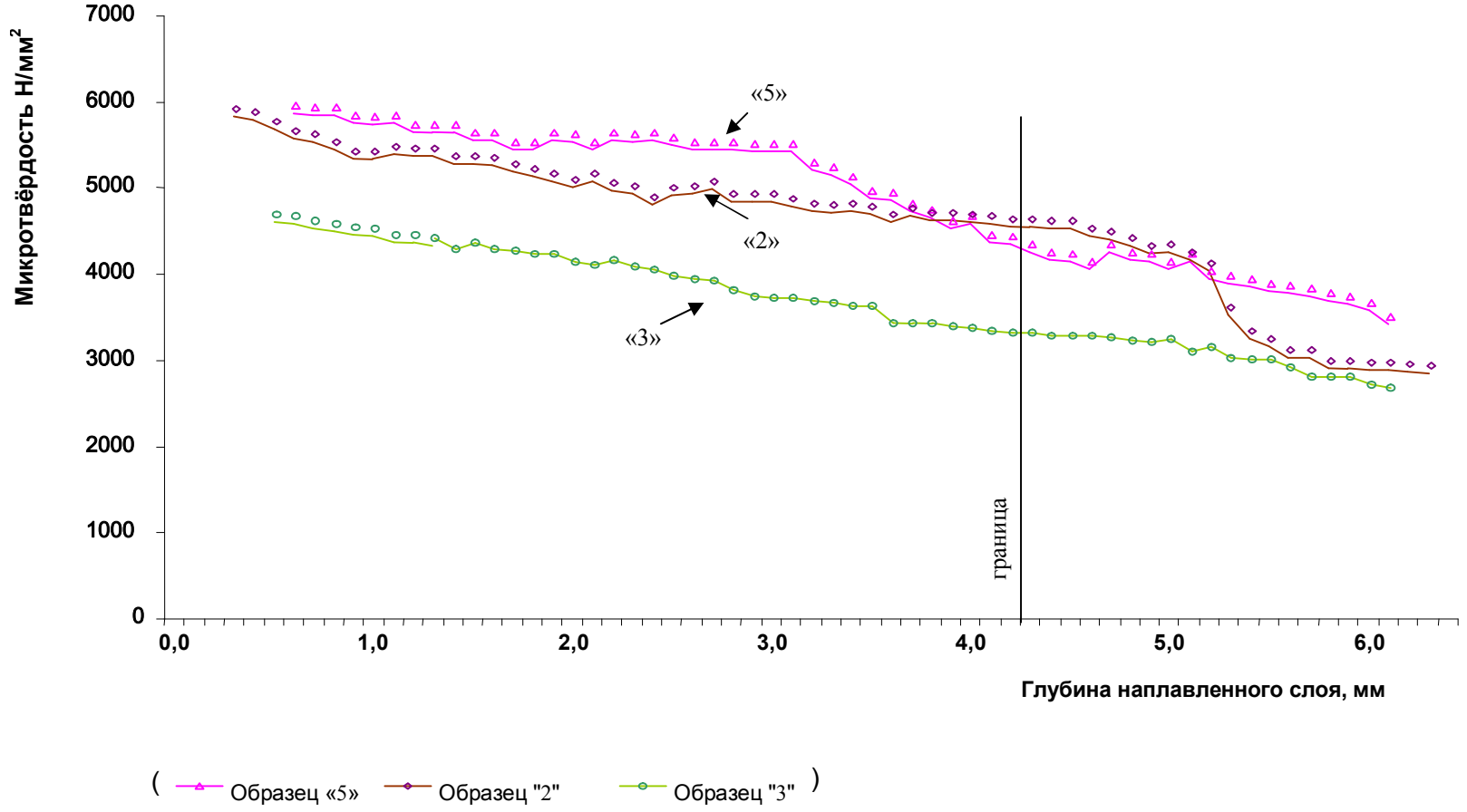


Рисунок 3.14 Графики зависимости микротвёрдости коренных шеек коленчатых валов от глубины наплавленного слоя.

3.3 Исследования износостойкости восстановленных чугунных коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53

В таблице 3.1 приведены результаты замера твердости роликов и их чистоты поверхности. Исходная шероховатость поверхностей образцов находится в пределах 10 класса [48, 64].

По твердости, образцы эталонной серии имеют значения в пределах ТУ с небольшим разбросом по окружности.

Разброс по твердости у всех образцов находился в пределах 3 единиц, хотя у третьей серии имелись отклонения, в особенности, когда твердость замерялась на стыке швов. Однако некоторые замеры твердости отбрасывались, как аномальные.

Твердость образцов наплавленных проволокой 15 ГЮСТЦА с добавкой в дугу ферромагнитной шихты несколько ниже требований ТУ, однако увеличение твердости, как было, выявлено ранее приводило к появлению трещин и пор.

Образцы третьей серии на 15-20 единиц по Роквеллу ниже требований ТУ. Причем нами брались для сравнения коленчатые валы наплавленные на Тургеньском РМЗ и АРО-2, однако твердость и у них находилась в этих пределах, что собственно явилось причиной для ведения этих исследований по разработке способа восстановления отвечающего требованиям ТУ.

Результаты (таблица 3.2) 120-ти часовых испытаний образцов 3 серий по 3 образца в каждой показали, что при меньшей твердости на 4-5 единиц по Роквеллу износостойкость образцов 2-ой серии в среднем на 4% выше новых (эталонных) что конечно в пределах ошибки измерений, но, тем не менее, измерения и испытания проводились при одних и тех же условиях, и можно считать, что образцы наплавленные широкослойной наплавкой проволокой 15 ГЮСТЦА с добавкой ферромагнитной шихты, по износостойкости равнозначны эталонным. Средне-игольчатый мартенсит, структура наплавленного металла, установленные выше, обладают высокой износостойкостью, а также наличие шаровидного графита обеспечивает самосмазывающее действие, что в целом и обеспечивает высокую износостойкость образцов этой серии.

Что касается образцов 3-ей серии, низкая твердость наплавленного металла предопределяет, как и предполагалось, невысокую износостойкость. Исследования показали:

- износостойкость образцов наплавленных широкослойной наплавкой проволокой 15 ГЮСТЦА с добавкой в дугу ферромагнитной шихты не ниже износостойкости эталонных, новых;

-относительная износостойкость образцов наплавленных по технологии ГОСНИТИ (винтовая наплавка проволокой 15 ГЮСТЦА охлаждаемой потоком воздуха) ниже новых на 20%.

Таблица 3.1 – Твердость образцов исследуемых серий валов

Образцов	Серия образцов	Твердость по Роквеллу (HRC)						Разброс max, HRC	Класс чистоты
		1	2	3	4	5	6		
1	Эталон (новый)	58	57	59	60	59	59	3	10
2		59	57	60	59	60	60	3	10
3		58	60	61	60	60	59	3	10
4	Наплавленный проволокой 15 ГЮСТЦА +ферромагнитный порошок	57	55	54	57	56	57	3	10
5		55	56	55	56	56	54	2	10
6		54	55	55	57	54	57	3	10
7	Проволока 15 ГЮСТЦА + сж.воздух (ГОСНИТИ)	40	42	43	41	42	43	3	10
8		41	43	43	40	41	43	3	10

Таблица 3.2 – Износ роликов и колодок за 120 часов испытаний

Образцы	Серия	Износ ролика, мкм	Среднее значение износа ролика по серии, мкм	Износ колодок, мг	Среднее значение износа колодок по серии, мг.	Относительная износостойкость %
1	Эталонный	0,074	0,0936	5,6	6,03	100%
2		0,115		5,9	6,03	100%
3		0,092		6,6	6,03	100%
4	Наплавленный проволокой 15 ГЮСТЦА + ферромагнитный порошок	0,089	0,0900	6,3	6,16	104%
5		0,104		6,4	6,16	104%
6		0,077		5,8	6,16	104%
7	Наплавленный проволокой 15 ГЮСТЦА + Сжатый воздух (ГОСНИТИ)	0,117	0,1153	7,1	7,06	80,3%
8		0,106		7,3	7,06	80,3%
9		0,123		6,8	7,06	80,3%

3.4 Исследования усталостной прочности восстановленных чугунных коленчатых валов двигателя ЗМЗ-53

Для натурных усталостных испытаний использованы новые серийные коленчатые валы ЗМЗ-53 и восстановленные по технологиям ГосНИТИ и КазНАУ. Не касаясь особенностей технологии восстановления коленчатых валов ЗМЗ-53 наплавкой, описанных ранее в главе 1, приведем краткие характеристики коленчатых валов испытанных серий. Данные о коленчатых валах двигателя ЗМЗ-53, которые были подвергнуты исследованиям на усталостную прочность, представлены в таблице.

Первая серия, эталонная, из новых коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53 испытана ранее в 1992….1995г [64, 65, 66. 77], поэтому были использованы уже имеющейся протоколы, первичных испытаний копии которых прилагаются. Тем не менее результаты статистической обработки усталостных испытаний эталонной серии были заново пересчитаны и уточнены после дополнительных испытаний ещё двух новых образцов в 1995г, которые не были учтены.

Нумерация серий коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53, восстановленных наплавкой по технологии ГосНИТИ и КазНАУ, девятая и десятая соответственно, присвоены согласно рекомендаций КазНИПИАТА, так как до наших испытаний у них проводились исследования других занумерованных серий восстановленных коленчатых валов ЗМЗ-53.

Результаты натурных усталостных испытаний коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53 исследованных серий сведены в протоколы. Анализируя усталостные разрушения коленчатых валов в процессе испытаний при заданных условиях нагружения, необходимо отметить три вида поломок.

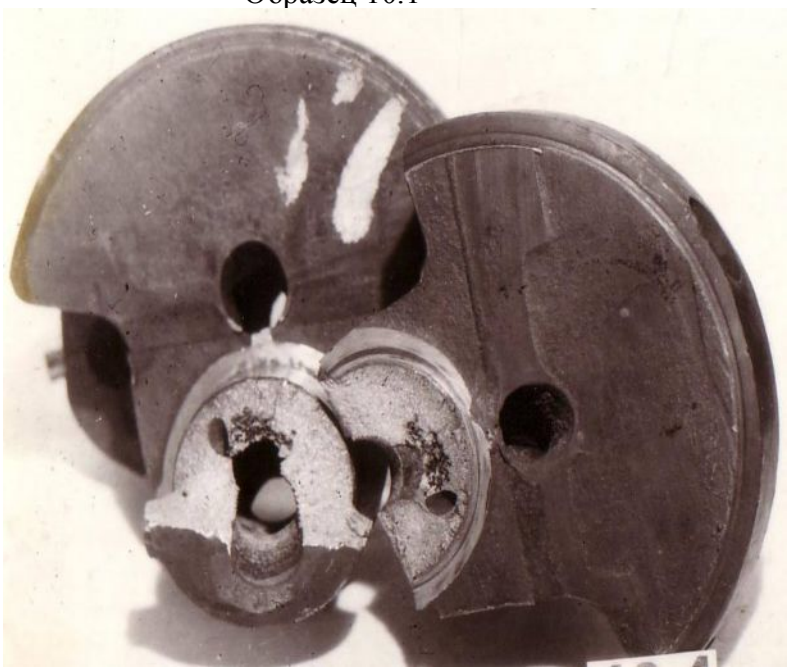
Первый тип разрушения. Зона зарождения и развития трещины совпадает с плоскостью расчетного опасного сечения. При этом площадь поперечного сечения испытываемой шатунной шейки поражается более, чем на 60%. Далее развитие трещины продолжается в сторону щеки, с поражением отверстия под резьбовую пробку.

Зона доломки (хрупкого разрушения) в этом случае, как правило, располагается полностью в наклонном сечении утонченной части щеки.

90% всех разрушений при испытании натурных коленчатых валов ЗМЗ-53 на усталость в наших условиях относятся именно к первому типу.

Аналогичной характер разрушения чугунных валов двигателей ЗМЗ-53 отмечен при эксплуатации. Первый тип разрушения иллюстрируется рисунком 3.15, на котором показаны усталостные разрушения образцов 10.1 и 10.2 коленчатых валов ЗМЗ-53, в результате испытаний [56, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90].

Образец 10.1



Образец 10.2

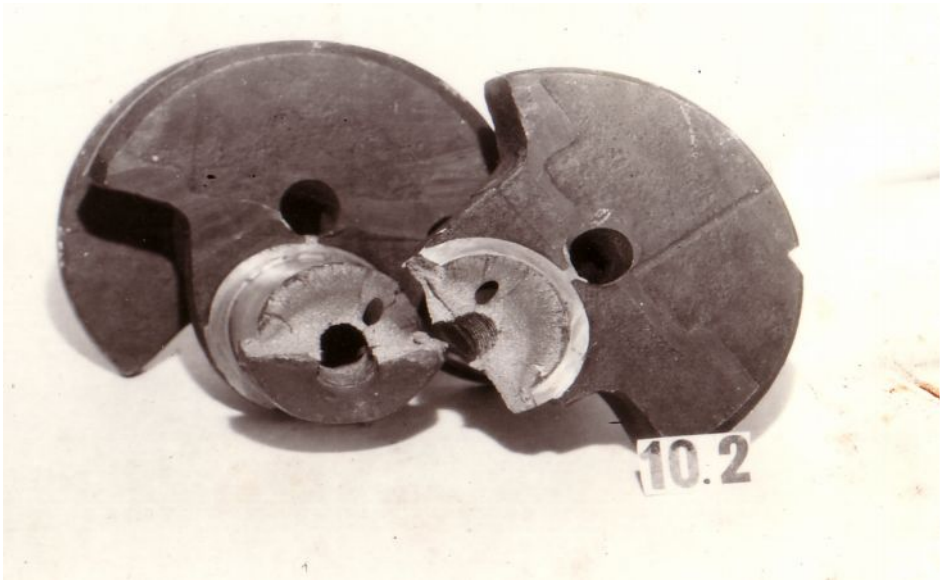


Рис. 3.15 Усталостные разрушения образцов 10.1 и 10.2 в процессе испытаний серии коленчатых валов ЗМЗ-53, восстановленных по технологии КазНАУ.

Второй тип разрушения. Трещина развивается и поражает все поперечное сечение шатунной шейки, не выходя на щеки. Отмечено всего две поломки по второму типу разрушения (менее 5% всех усталостных

поломок при испытании). Следует обратить внимание на то, что второй тип поломок дает наглядное представление об расчетном опасном сечении и еще раз подтверждает правильность методики усталостных испытаний.

Третий тип разрушения. Аналогичен первому виду поломок и отличается от него лишь местом расположения. Если в опасном сечении при выбранной схеме защемления и форме образцов приведенный момент $M'_{пр}$ и соответственно, действующие напряжения имеют наибольшее значение, то при разрушении третьего типа эти величины меньше примерно на 30%.

Тем не менее зарегистрировано три поломки данного вида, причем только на наплавленных валах, наработка которых до восстановления неизвестна.

Образцы разрушились по менее опасному сечению при действующих напряжениях, намного меньше разрушающих. Из этого вытекает предположение о том, что сечение у передней галтели таких образцов наиболее слабое и меньшие напряжения вызывают по нему разрушение. Действительно, рассмотрение и анализ разрушенных сечений третьего типа подтверждает наличие больших дефектов - трещин, литейных раковин средним диаметром 10-12 мм, значительных несплошностей.

В процессе эксплуатации накопление повреждений в этих сечениях происходит более интенсивно, поэтому такие образцы в условиях натурных усталостных испытаний обладают меньшей циклической долговечностью при одном и том же уровне напряжений. Необходимо отметить, что одновременно с развитием повреждений по третьему типу идет разрушение с образованием и развитием трещин по опасному сечению.

При расчете номинальных напряжений для образцов с разрушениями третьего вида за опасное сечение принималось поперечное сечение возле передней галтели шатунной шейки с плечом приложения нагрузки, равным 108 мм.

Обработка результатов натурных усталостных испытаний коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53 исследуемых серий по принятой методике с использованием зависимости Л.В.Муратова дает следующее усредненное значение предела выносливости:

1. Эталонная серия. Вариационный ряд: 4,92; 5,36; 5,36; 5,37; 5,39; 5,44; 5,45; 5,57; 5,72; 5,72; 5,75; 5,75; 5,83; 5,83; 5,87; 5,87; 5,95; 5,99; 6,07; 6,16; 6,20; 6,40; 7,50; 7,75 $\frac{кг}{мм^2}$.

$$\bar{x}_i = \sigma_{-1}^{19} = 5{,}997 = 6{,}00 \frac{кг}{мм^2}; \qquad S = 0{,}523 \frac{кг}{мм^2}; \qquad \gamma = 8{,}7\%.$$

2. Девятая серия. Технология ГосНИТИ. Вариационный ряд: 5.77; 4.63; 4,44; 4.26; 4,00; 3,95; 3,90; 3,88; 3,85; 3,84; 3,80; 3,69; 2,80; 2,13 $\frac{кг}{мм^2}$.

$$\bar{x}_i^{cp} = \sigma_{-1}^{9} = 3{,}93\frac{кг}{мм^2}; \qquad S = 0{,}770\frac{кг}{мм^2}; \qquad \gamma = 20{,}2\%.$$

3. Десятая серия. Технология КазНАУ. Вариационный ряд: 1,54; 3,79; 4,22; 4,43; 4,46; 4,47; 4,47; 4,48; 4,48; 4,52; 4,54; 4,55; 4,82; 4,86; 5,00 $\frac{кг}{мм^2}$.

$$\bar{x}_i^{cp} = \sigma_{-1}^{10} = 4{,}51\frac{кг}{мм^2}; \qquad S = 0.290\frac{кг}{мм^2}; \qquad \gamma = 6{,}40\%.$$

Для восстановленных деталей исследованных серий значение предела выносливости равно:

-для наплавленных по технологии ГосНИТИ – 3,93 $\frac{кг}{мм^2}$;

-для наплавленных по технологии КазНАУ – 4,51 $\frac{кг}{мм^2}$;

Согласно протоколам испытаний, расчётные значения пределов выносливости, характеристики рассеяния его значения для каждой из испытанных серий, а также сравнительная долговечность при циклическом нагружении. Производя сравнительную оценку усталостной прочности восстановленных наплавкой коленчатых валов ЗМЗ-53 по величине предела выносливости (графы 6 и 7 таблицы 3.3) убеждаемся в том, что для них отмечается снижение усталостной прочности на 25…35% по отношению к новым. В графе 8 таблицы 3.3 приведены также уравнения кривых повреждаемости, определенные методом наименьших квадратов. Указанные кривые усталости коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53 испытанных серий построены на рисунке 3.16.

Анализ кривых повреждаемости показывает, что коленчатые валы, восстановленные по технологиям с применением электродуговой наплавки, имеют тенденцию к значительному снижению усталостной прочности.

Нагрев шеек при наплавке чугунных коленчатых валов, количество выделенного тепла и различные градиенты скоростей охлаждения приводят к большой потере усталостной прочности и вызывают значительное рассеяние циклической долговечности.

С целью подбора уравнения левой ветви кривой повреждаемости, оценки параметров и построения ее на графике усталостных испытаний был проведен линейный регрессионный анализ полученных эмпирических данных для каждой серии испытанных коленчатых валов методом наименьших квадратов.

При обработке использовались методика и рекомендации работ [64, 91, 92]. Эмпирические уравнения линии регрессии для валов каждой серии имеют вид:

1.Эталонная:

$$y = 6{,}3426 - 0{,}5070(x - 6{,}8800) \qquad или \qquad y_i = 9{,}8311 - 0{,}5070x_i \tag{3.1}$$

2.Технология ГосНИТИ:.

$$y = 5{,}6822 - 0{,}5072(x - 5{,}0400) \quad \textit{или} \quad y_i = 8{,}2385 - 0{,}5072x_i \tag{3.2}$$

3.Технология КазНАУ:

$$y = 5{,}8296 - 0{,}5534(x - 5{,}6550) \quad \textit{или} \quad y_i = 8{,}9591 - 0{,}5534x_i \tag{3.3}$$

Все реальные разрушения валов каждой серии, нанесенные на графике усталостных испытаний рисунок 3.13 в полулогарифмических координатах, согласно [12, 13, 14] группируются вокруг этих линий с наименьшими возможными отклонениями.

Для нанесения линии регрессия на графике используется данные таблицы 3.13, графы 2,4 и 8.

Рассмотрение действующих напряжений и характера разрушения (графы 3 и 5 таблицы 3.3) испытанных коленчатых валов позволяет оценить циклическую прочность. Очевидно, что все восстановленные валы разрушаются при напряжениях меньших, чем у новых. Так, для эталонной серии три образца выдержали, не разрушившись, базу испытаний в 10 млн. циклов. Ожидаемый предел выносливости для новых коленчатых валов ЗМЗ-53, следовательно, должен находиться в диапазоне 5,60…6,20 $\frac{кг}{мм^2}$. Для девятой серии коленчатых валов, восстановленных наплавкой по технологии ГосНИТИ, вес шесть образцов разрушились при меньшем напряжении 4,00 $\frac{кг}{мм^2}$, поэтому их предел выносливости должен находится ниже этого уровня. Для коленчатых валов десятой серии, восстановленных наплавкой по технологии КазНАУ, значение ожидаемого предела усталости находиться в пределах 4,63…4,50 $\frac{кг}{мм^2}$, так как число циклов выдержанных образцами при этом равно 2,5…10,0 млн.

Анализ полученных результатов натурных усталостных испытаний приводит к выводу о том, что коленчатые валы ЗМЗ-53, восстановленные наплавкой, обладают пониженной циклической прочностью в сравнении с новыми деталями.

Таблица 3.3 Характеристика усталостной прочности испытанных коленчатых валов ЗМЗ-53

Наименование серии	Пределы усталости, $\sigma_{-1}, \frac{кг}{мм^2}$	Дисперсия, S	Средне квадратичные отклонения, σ^2	Коэффициенты вариации, γ, %	Сравнительная долговечность (по отношению к новым валам)		Уравнение кривой повреждаемости	Примечание
					%	во сколько раз		
1	2	3	4	5	6	7	8	10
1-я серия. Эталонная (новые детали).	6,00	0,274	0,523	8,7	100	1,00	У=9,831-0,507Х	По восьми образ-цам
9-я серия. Восстановленные по технологии ГосНИТИ.	3,93	0,593	0,770	20,2	65,5	1,53	У=8,238-0,507Х	
10-я серия. Восстановленные по технологии КазНАУ	4,51	0,084	0,290	6,40	75,2	1,33	У=8,959-0,553Х	

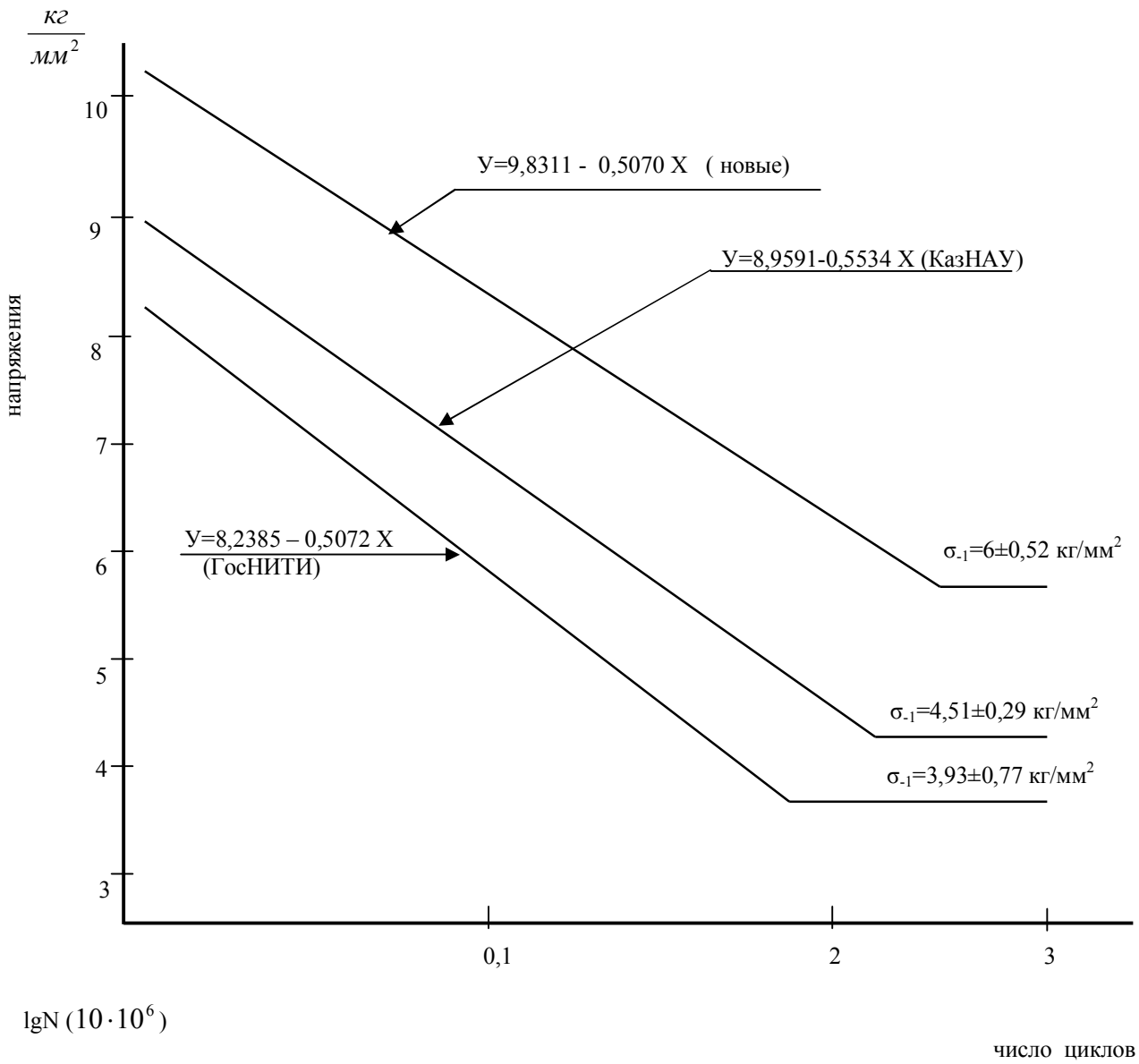


Рисунок 3.16 Кривые повреждаемости коленчатых валов двигателя ЗМЗ- 53

Анализ полученных при натурных усталостных испытаниях данных при помощи аппарата математической статистики и ускоренных методов определения предела выносливости, в частности, по известному уравнению Л.В.Муратова, позволяет количественно оценить циклическую прочность испытанных деталей. Проведение расчеты [10] показывают (см. таблицу 3.3), что новые коленчатые валы ЗМЗ-53 имеют расчетное значение предела выносливости $5{,}93\ldots6{,}00\frac{кг}{мм^2}$.

Оценим циклическую прочность испытанных коленчатых валов при действующем напряжении, равном $6{,}00\ \frac{кг}{мм^2}$.Такое значение рабочего напряжения выбрано не случайно и основывается на следующих соображениях.

Напряжение в $6{,}00\frac{кг}{мм^2}$ соответствует пределу выносливости новых коленчатых валов ЗМЗ-53 и более высоких уровней нагружения в условиях работы капитально – отремонтированных двигателей вполне реально, так как при эксплуатации наблюдаются поломки и неподвергавшихся наплавке коленчатых валов. При этом отмечается значительное нарушение геометрии, как самих коленчатых валов, так и сопрягаемых коренных опор блока.

При выбранном напряжении новые детали выдерживают базу испытаний в 10^7 циклов. Долговечность восстановленных коленчатых валов по технологии ГосНИТИ – 160 тысяч циклов; по технологии КазНАУ – 440 тысяч циклов (см. рисунок 3.13). Снижение усталостной прочности в данных условиях составляет: для технологии ГосНИТИ – 34,5 %; для технологии КазНАУ – 24,8 %. В этих условиях сравнительная долговечность коленчатых валов ЗМЗ-53, восстановленных по технологии КазНАУ, выше наплавленных по технологии ГосНИТИ. Однако, основываясь на приведенных данных натурных усталостных испытаний и ранее имеющегося опыта [64, 65, 66] можно предположить, что вероятность разрушения в процессе эксплуатации наплавленных исследуемыми способами чугунных коленчатых валов всё-таки будет достаточно высокой.

Дело в том, что наплавленные чугунные коленчатые валы имеют более высокую чувствительность к концентрации напряжений и циклическим нагрузками, чем стальные коленчатые валы, что в итоге и вызывает такое резкое снижение их усталостной прочности после восстановления. Источником же высоких действующих напряжений являются отклонения геометрических параметров коленчатых валов и блоков (биение, прогиб и несоосность) от требований технических условий завода- изготовителя.

Анализ приведенных результатов натурных усталостных испытаний коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53 исследованных серий позволяет сделать следующие выводы:

1. Из трёх исследованных серий коленчатых валов двигателя ЗМЗ-53 наибольшей долговечностью обладают эталонные детали. Предел выносливости новых коленчатых валов составляет 6,00 $\frac{кг}{мм^2}$.

2. Полученное значение величины предела выносливости для валов из магниевого чугуна с шаровидном графитом серийно выпускаемых в настоящее время Заволжским моторным заводом, совпадает с результатами других исследований. По данным лаборатории прочности цеха испытаний КЭС ГАЗ, предел выносливости таких коленчатых валов лежит в пределах $6{,}0\text{-}6{,}5\frac{кг}{мм^2}$.

3. Предел выносливости восстановленных наплавкой по технологии ГосНИТИ коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53 равен 3,93 $\frac{кг}{мм^2}$, что составляет 65,5 % от прочности новых коленчатых валов.

4. Усталостная долговечность чугунных коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53, восстановленных широкослойной наплавкой проволокой 15 ГЮСТЦА с добавкой ферромагнитного порошка, ниже новых деталей на 24,8% или 75,2% от уровня новых коленчатых валов ЗМЗ-53.

5. Полученное при испытаниях значение предела усталости равно $4{,}51\frac{кг}{мм^2}$, что для малоцикловой усталости при действующих напряжения свыше $6{,}00\frac{кг}{мм^2}$ отмечается для восстановленных наплавкой коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53, представляет снижение усталостной прочности.

6. С целью исключения действия высоких напряжений и поломок коленчатых валов в эксплуатации необходимо рекомендовать ужесточение допусков на геометрию коленчатых валов по прогибам (биению) и блоку – несоосности коренных опор.

7. Предлагаемая методика натурных усталостных испытаний полностью отработана и её применение оправдывается практикой стендовых испытаний. Представляется возможным рекомендовать её как типовую при испытании различных деталей на усталость.

3.5 Эксплуатационные испытания восстановления чугунных коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53.

Изношенные коленчатые валы двигателей из высокопрочного чугуна, в настоящее время реставрируют различными способами наплавки. Каждый из этих способов имеет свои технологические, технические и экономические преимущества и недостатки. Но общими недостатками всех технологий восстановления являются невысокая усталостная прочность и износостойкость восстанавливаемых валов в сравнении с новыми. Тем не менее, эти способы продолжают применяться для реставрации коленчатых валов в Казахстане, России и других странах СНГ.

Один из таких способов восстановления чугунных коленчатых валов был разработан в Казахском национальном аграрном университете. Это способ широкослойной наплавки с добавлением в дугу порошковой ферромагнитной шихты.

Целью разработки данного способа восстановление было достижение более высокой усталостной прочности и износостойкости восстановленных коленчатых валов по сравнению с другими способами.

Для оценки этих параметров для чугунных коленчатых валов, восстановленных по технологии КазНАУ, были проведены их сравнительные эксплуатационные испытания.

На эксплуатационные испытания согласно разработанной методике были поставлены коленчатые валы двигателей ЗМЗ-53 трёх серий – новые, восстановленные по технологии КазНАУ и по технологии ГОСНИТИ.

Для эксплуатационных испытаний было собрано 8 двигателей с общим количеством испытуемых шеек по наблюдаемым сериям:

- эталонная (новая) – 2 двигателя-26 шеек;
- технология КазНАУ – 3 двигателя-39 шеек;
- технология ГОСНИТИ - 3 двигателя-39 шеек.

Были получены в качестве запасных частей с Заволжского моторного завода два новых коленчатых вала ЗМЗ-53 эталонной серии и без всяких технологических воздействий на коренные и шатунные шейки поставлены на испытания.

Восстановленные коленчатые валы по технологиям КазНАУ и ГосНИТИ в условиях Первомайской РТМ также без дополнительных воздействий устанавливались в двигатели. По геометрическим параметрам эталонные и восстановленные коленчатые валы, а также сопрягаемые с ними детали цилиндропоршневой группы и кривошипно-шатунного механизма отвечали требованиям технических условий на капитальный ремонт. Незначительная величина моментов прокручивания коленчатого вала после затяжки коренных подшипников (12,0…21,0 н • м) и двигателей в сборе (50…60 н • м) свидетельствуют о хорошей геометрии установленных деталей и следовательно, о высоком качестве сборки экспериментальных двигателей.

Обычные отремонтированные двигатели рядовой сборки, как правило, имеют момент прокручивания 130…140 н • м , что в 2…3 раза выше значений моментов прокручивания собранных экспериментальных двигателей. Износ шеек коленчатых валов определялся методом искусственных баз, сущность которого заключается в нанесении на поверхности шеек и вкладышей отпечатков, путем вдавливания алмазного конуса на твердомере ТК-2. В процессе работы рабочие поверхности истираются, что приводит к уменьшению глубины отпечатка. Разность первоначальной и конечной глубины искусственной базы и определяется степень износа.

Методикой испытании не ставилась цель получения максимально возможных пробегов испытуемых автомобилей, т.к. время испытаний было ограничено одним календарным годом. Поэтому испытания были прекращены при пробегах от 36,9 до 73,0 тысяч километров.

За время наблюдений усталостных поломок испытуемых коленчатых валов не наблюдалось. Но исходя из результатов лабораторных испытаний на усталостную прочность, согласно которым она составляет 75% от мах, можно утверждать, что усталостная прочность валов обеспечит нормальную их эксплуатацию [65].

Контрольная эксплуатация экспериментальных двигателей осуществлялась в автобусном парке. Двигатели устанавливались на автобусы ПАЗ-672, эксплуатирующихся на равнозначных маршрутах в пределах Алма-атинской области. Сведения об установке экспериментальных двигателей на автобусы приведены в таблице 3.4. Ниже, в таблице 3.5, приводятся данные о времени наблюдения за каждым экспериментальным двигателем. В начальных графах указываются дата начала и конца эксплуатации, ежемесячный пробег и наработка с нарастающим итогом, а

также суммарная наработка и краткая причина снятия двигателей с испытаний.

Сопоставляя пробеги экспериментальных двигателей необходимо напомнить о том, что методикой испытаний не ставилась цель получения максимально возможных пробегов, так как время испытаний было принято ограниченным в течении одного календарного года. Поэтому исходя из основной задачи эксплуатационных испытаний, экспериментальные двигатели снимались с автобусов при первой же возможности, при минимальной наработке для заключительного микрометража, если только сопряжение «шейка-вкладыш» имели достоверно устанавливаемые износы. Именно поэтому были прекращены испытания при пробеге 36,9-73,0 тыс. километров, хотя ресурс их по сопряжениям кривошипно-шатунного механизма, в частности «шейка-вкладыш», был далеко не исчерпан.

Окончательная обработка первичных данных и представление конечных результатов эксплуатационных испытаний приведены в соответствии с ранее принятой методикой.

Как показывает рассмотрение картины износов шатунных шеек испытанных коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53, распределение радиальных износов совпадает с картиной износа стальных коленчатых валов двигателей ЗИЛ-130. Характер износа шатунных шеек, по-видимому, является общим для всех V- образных двигателей, имеющих угол развала цилиндров от вертикали 45^0.

Максимальный радиальный износ большинства шатунных шеек располагается в плоскости оси цилиндров, или смещен при положении каждого кривошипа в вертикальном положении на 45^0, то есть совпадает с действием максимальных сил инерции и рабочего давления. К сожалению, конструктивные особенности коленчатых валов двигателей испытуемых моделей и прибора УПОИВ-2 не позволили применить метод вырезанных лунок для измерения износа на всех коренных шейках. Дело в том, что в центральной части коренной шейки имеется отверстие для подвода смазки, а вкладыши - специальную канавку, поэтому в плоскости масляного отверстия на коренной шейке образуется неизнашиваемой пояс. Сместить же пояс нарезания лунок к галтелям не позволяют, из-за малой ширины шейки, зажимные призмы прибора, которые при этом упираются в щеки и нарезаемая лунка располагается в неизнашиваемой зоне. Поэтому измерялся диаметральный износ средних коренных шеек, для чего использовался резьбовой микрометр 50-75 мм со специальными вставками, позволяющими с точностью 0,01 мм измерять диаметры коренных шеек в 5-7 мм от галтелей. Анализ износов коренных шеек коленчатых валов ЗМЗ- 53 по картам микрометража показывает, что 2,3 и 4 коренные шейки изнашиваются равномерно по окружности или по поверхности трения в угловых мерах отсчета. Исходя из этого в дальнейшем был принят за критерий оценки долговечности коленчатых валов темп или интенсивность изнашивания, причем суммированное , средне-арифметическое его значение, выраженное в микронах на тысячу километров пробега [65, 66].

Таблица 3.4 – Наработка экспериментальных двигателей в ходе эксплуатационных испытаний

Маркировка коленчатого вала	Гос. Номер автобуса	Дата		Наработка помесячно (с нарастающим итогом)											
		установки	Снятия	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1 Эт. новый	21-13	14.12.92	20.05.94	4070	6115	2130	6010	4750	8135	6970	4260	1430	3790	3185	3520
				15995	22110	24240	30250	35000	43135	50105	54365	1430	5220	8405	11925
		Наработка, 72800 км		3365	1535	СНЯТ С ИСПЫТАНИЙ						3630	2870	2165	3870
				71265	72800							57995	60865	63030	67900
2 Эт. новый	32-04	07.04.93	17.03.94	3900	5395	7150	9475	3960	4230	8040	4900	5120			
				3900	9295	16445	25920	29880	34110	42150	47050	52170			
		Наработка 57760 км				СНЯТ С ИСПЫТАНИЙ							2310	1820	1460
													54480	56300	57760
2.1 КазНАУ	21-17	10.02.93	16.11.93	4430	8230	7680	6405	9035	8120	1245	2355	Снят с испытаний		1240	3460
				9130	17360	25040	31445	40480	48600	49845	52200			1240	4700
		Наработка 52200 км													
2.2 КазНАУ	51-19	17.12.92	19.10.93									590	1470	1945	3020
												590	2060	4005	7025
		Наработка 36900 км		4815	5190	6245	5660	1710	4370	1885	СНЯТ С ИСПЫТАНИЙ				
				11840	17030	23275	28935	30645	35015	36900					

Продолжение таблицы 3.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
2.3 КазНАУ	51-89	21.01.93	25.11.93	3810	4390	5240	5260	3290	4765	5465	6470		470	2760	3180
				10220	14610	19850	25110	28400	33165	38630	45100		470	3230	6410
		Наработка 45100 км					СНЯТ С ИСПЫТАНИЙ								
3.1 ГосНИТИ	32-99	16.03.93	08.06.94	4565	6170	5725	5820	6315	5635	6240	4320	2615			2030
				6595	12765	18490	24310	30625	36260	42500	46820	49435			2030
		Наработка 60400 км		2305	1300	700	СНЯТ С ИСПЫТАНИЙ						2585	1980	2100
				58400	59700	60400							52015	53995	56095
3.2 ГосНИТИ	11-23	27.01.93	14.12.93	4370	5860	6925	6875	5740	3170	2100	1960	700	290	1480	2840
				8980	14840	21765	28640	34380	37550	39650	41600	42300	290	1770	4610
		Наработка 42300 км					СНЯТ С ИСПЫТАНИЙ								
3.3 ГосНИТИ	94-47	31.03.93	24.03.94	2370	3700	4870	4760	4470	4210	3870	3560	2870	Снят с испытаний		
				2370	6070	10940	15700	20170	24380	28250	31810	34680			
		Наработка 40400 км											2570	2100	1050
													37250	39350	40400

Таблица 3.5 – Время наблюдения экспериментальных двигателей

№ экспер. двигат.	Гос. номер автомобиля ПАЗ-672	№ маршрута	№ блока	Дата установки	Показания спидометра	Фамилия водителя
1 эт	21-13	216	472041	14.12.93	23100	
2 эт	32-04	322	350111	07.04.94	41300	
2.1	21-17	233	266714	10.02.94	66550	
2.2	51-19	312	565413	17.12.93	83000	
2.3	51-89	210	343587	21.01.94	76800	
3.1	32-99	113	397116	16.03.94.	38450	
3.2	11-23	133	719458	27.01.94	20750	
3.3	94-47	153	375448	31.03.94	72250	

Максимальный радиальный износ большинства шатунных шеек испытанных серий коленчатых валов расположен в плоскости оси цилиндров при положении кривошипов в верхней точке, на вертикали, то есть оказывается смещенным на 45^0 влево для 1 – 4 шеек и вправо для 5 – 8 -ой, совпадая с действием наибольших сил инерции и рабочего давления.

Ниже в таблице 3.6 приводится интенсивность изнашивания и характеристики её рассеяния, полученные при эксплуатационных испытаниях трех исследованных серий коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53.

Таблица 3.6 – Радиальный износ испытанных коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53

Характеристика шеек коленчатых валов	Темп износа, мкм/тыс.км	Средне квадратичное отклонение S, мкм/тыс.км	Коэффициент вариации, γ,%
	Шатунные шейки		
Эталонные (новый)	0,054	0,015	27,5
КазНАУ	0,052	0,017	32,7
ГосНИТИ	0,103	0,036	35,1
	Коренные шейки		
Эталонные (новый)	0,380	0,086	23,0
КазНАУ	0,385	0,098	23,4
ГосНИТИ	0,658	0,161	25,1

При одинаковых коэффициентах неравномерности износа (1,10…1,65) и вариации (23,0-35,5%) для трех испытанных серий коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53 абсолютные значения интенсивности изнашивания имеют, соответственно, такие значения:

- шатунные шейки 0,054; 0,052; и 0,103 мкм/тыс.км
- коренные шейки 0,380; 0,385 и 0,658 на мкм/тыс.км.

Анализируя полученные данные можно установить, что интенсивность изнашивания шатунных шеек валов, как для эталонных, так и восстановленных меньше коренных. Данная закономерность существует как для эталонных валов так и для восстановленных по технологиям ГосНИТИ и КазНАУ. Это положение подтверждается ранее проведенными эксплуатационными испытаниями восстановленных коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53, при которых получен темп износа шатунных шеек в 6,0…8,0 раз меньше коренных [93, 94].

По абсолютной величине интенсивность изнашивания новых шеек чугунных коленчатых валов, полученная в результате проведения настоящих эксплуатационных испытаний, совпадает с данными работы [66]. По данным КазНИПИАТа диаметральный темп износа коренных шеек равен 0,67±0.34 мкм/тыс.км , а шатунных шеек 0,085±0.048 мкм/тыс.км. Для коренных шеек новых коленчатых валов ЗМЗ-21 из высокопрочного магниевого чугуна с шаровидным графитом авторами работы [66] Мазухиным Н.Г и Воденисовым А.Я для условий стационарной работы двигателя, определена интенсивность изнашивания, равная 0,615 мкм/тыс.км. В два раза большее значение темпа изнашивания шатунных шеек по сравнению с нашими данными может быть объяснено, различными условиями испытаний и конструктивными отличиями двигателей, а так же различиями методик и погрешностями примененных способов определения износов [94, 95, 96].

Результаты сравнительной оценки износостойкости новых и восстановленных наплавкой по технологии КазНАУ и ГосНИТИ коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53 приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Сравнительная оценка износостойкости новых и восстановленных на плавкой коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53

Наименование серий испытанных коленчатых валов	Износостойкость шеек валов в %		Износостойкость в общем по валу, %
	коренные	шатунные	
1. Новые, эталонные	100,0	100,0	100,0
2. Восстановленные по технологии КазНАУ	98,7	103,85	101,28
3. Восстановленные по технологии ГОСНИТИ	57,75	52,4	55,08

Априори износостойкость новых деталей, коленчатых валов эталонной серии, принята за 100% или равной единице.

Как видно из таблицы 3.7 износостойкость коленчатых валов, восстановленных по технологии КазНАУ, находится на уровне новых деталей (101,28%), а по шатунным шейкам превышает на 3,85 %, что хорошо согласуется с данными лабораторных исследований (104%) [66].

Износостойкость коленчатых валов, восстановленных по технологии ГОСНИТИ, составляет 57,75% для коренных шеек и 52,4% для шатунных шеек,

в сравнении с новыми, эталонными коленчатыми валами двигателей ЗМЗ-53, а также восстановленных по технологии КазНАУ. Более наглядно эти соотношения изображены на диаграмме сравнительной износостойкости, приведенной на рисунке 3.17.

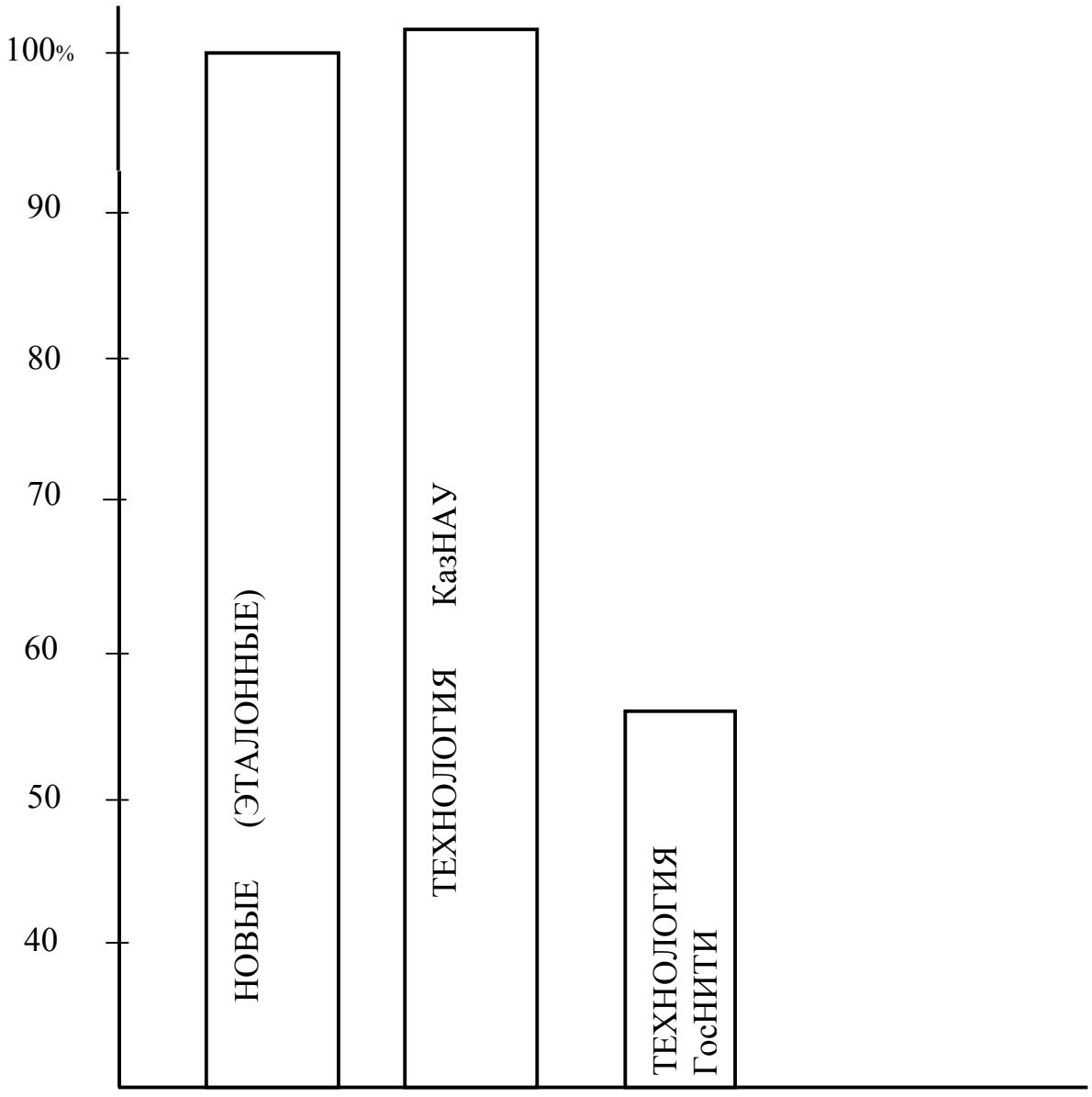


Рисунок 3.17 Диаграмма сравнительной износостойкости испытанных серий коленчатых валов

Микрометраж коленчатых валов и вкладышей всех двигателей проводился в мае и начале октября 2004 года. При этом пробег автомобилей колебался при первом микрометраже 55…60 тыс.км, при втором 10…15 тыс.км. Во втором промежутке интенсивность эксплуатации увеличилась, поскольку был сезон строительных и полевых работ, на которых использовались автомашины.

Средняя величина износа коренных шеек выше, чем шатунных у всех валов, что согласуется с данными других исследований. Поэтому для

исследования сравнительной износостойкости исследуемых коленчатых валов нами использовались данные микрометража коренных шеек коленчатых валов.

Средняя величина износа коренных шеек коленчатых валов по сериям представлена в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Средняя величина износа коренных и шатунных шеек коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53

№ п/п	Серии	Пробег, км	
		Величина износа, мм	
		шатунной	коренной
1	Новые (эталонные)	60910	74500
		0,043	0,052
2	Восстановленные по винтовой линии (технология ГОСНИТИ)	56881	67545
		0,051	0,061
3	Восстановленные широкослойной наплавкой проволокой 15ГЮСТЦА (технология КазНАУ)	61243	70062
		0,037	0,042

Отметим, что величина износа вкладышей была незначительна в пределах нескольких микрон (2-6 мкм), и только у одного из шатунных вкладышей наблюдался износ около 9 мкм.

На основании данных микрометража построены графики износа коренных и шатунных шеек коленчатых валов (рисунок 3.18, 3.19).

В соответствии с полученными данными микрометража скорости изнашивания для восстановленных и нового валов составляют:

$$V_{ГОСНИТИ} = \frac{И}{П} = \frac{0{,}027}{30000} = 9 \bullet 10^{-7} \frac{мм}{км};$$

$$V_{КазНАУ} = \frac{И}{П} = \frac{0{,}02}{30000} = 6 \bullet 10^{-7} \frac{мм}{км};$$

$$V_{Н} = \frac{И}{П} = \frac{0{,}021}{30000} = 7 \bullet 10^{-7} \frac{мм}{км}.$$

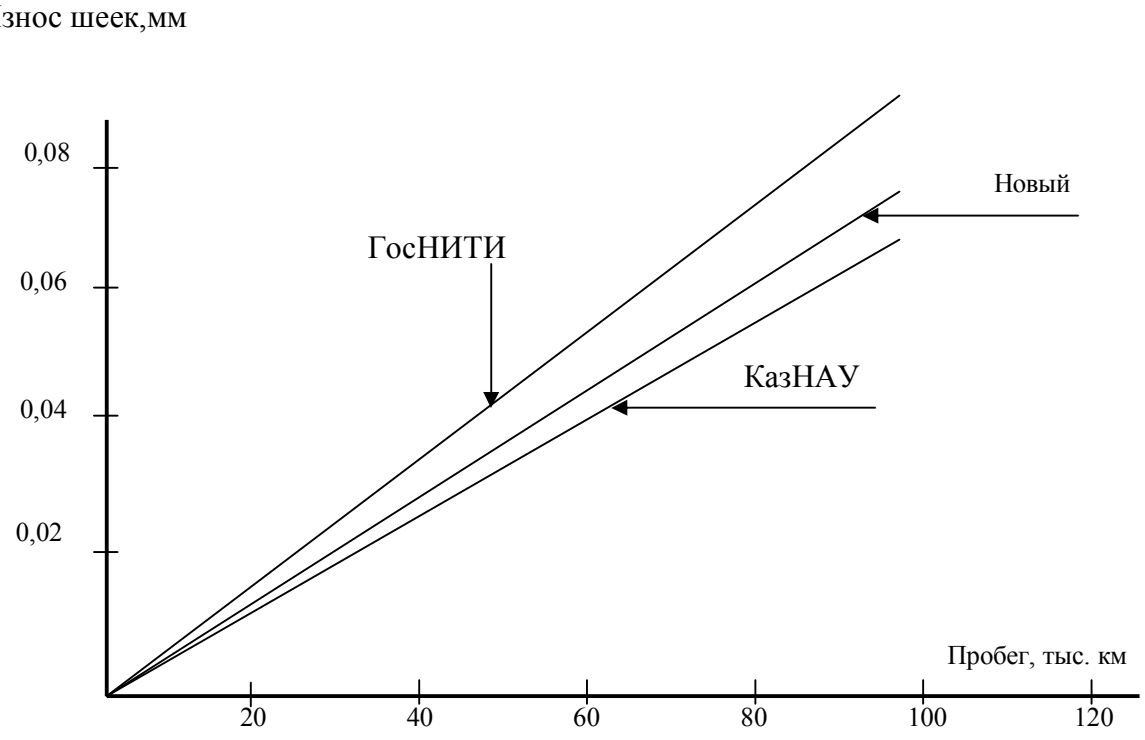


Рисунок 3.18 График износа шатунных шеек коленчатых валов двигателя ЗМЗ-53

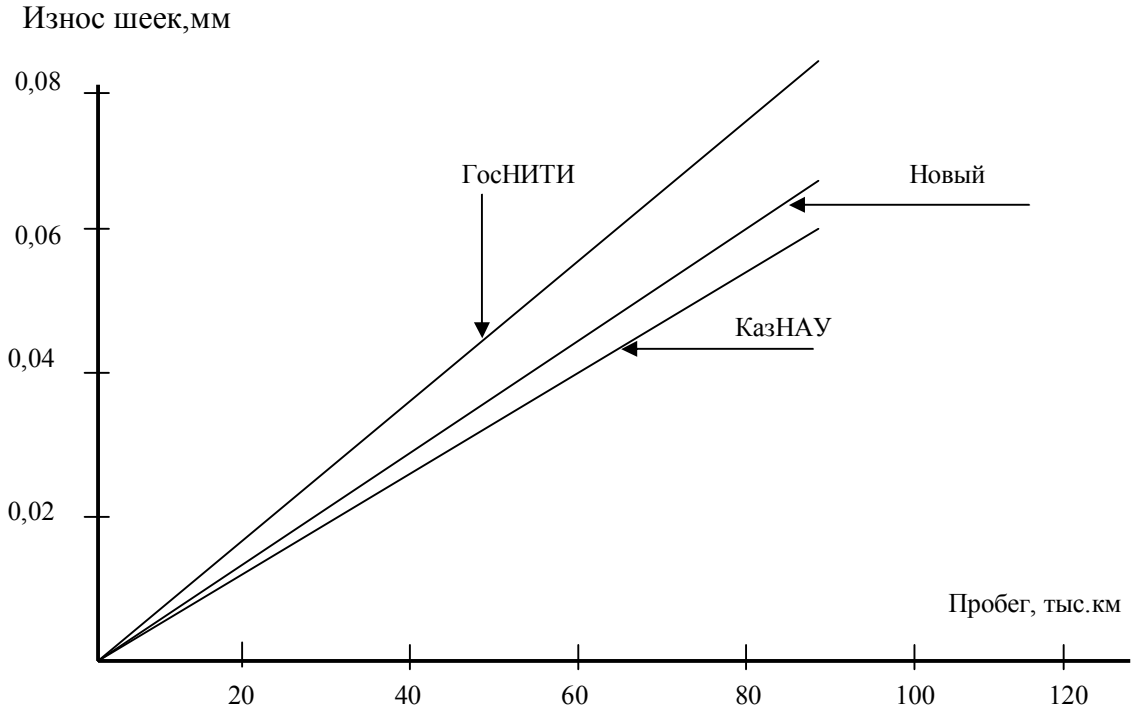


Рисунок 3.19 График износа коренных шеек коленчатых валов двигателя ЗМЗ-53

превышает износостойкости валов восстановленных по технологии ГОСНИТИ.

Проявлений усталостного разрушения-трещин, выкрашиваний, поломок ни по одной из серий наблюдаемых коленчатых валов не было выявлено.

По результатам эксплуатационных испытаний трех серий коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53 новых, эталонной серии и восстановленных наплавкой по технологиям КазНАУ и ГосНИТИ, можно сделать следующие обобщающие выводы:

- предложенную методику эксплуатационных испытаний следует признать пригодной для оценки долговечности восстанавливаемых деталей и двигателей в целом;

- максимальный износ шатунных шеек расположен в плоскости оси цилиндров при положении кривошипов в ВМТ, т.е. смещен на 45^0 влево для 1…4 шеек и вправо для 5…8–ой, совпадая с направлением действия наибольших сил инерции и рабочего давления;

- по абсолютной величине интенсивность изнашивания испытанных новых чугунных коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53 согласуется с данными других исследователей;

- износостойкость коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53, восстановленных наплавкой по технологии КазНАУ, находятся на уровне износов новых деталей (1,3%), а по шатунным шейкам на 3,75% превышает её;

- износостойкость коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53, восстановленных наплавкой по технологии ГосНИТИ, составляет 57,75% для коренных и 52,40% для шатунных шеек относительно новых эталонных коленчатых валов;

- характер и картина изнашивания коренных и шатунных подшипников для всех V- образных двигателей, имеющих угол развала цилиндров от вертикальной плоскости $\pm 45^0$, по-видимому, являются общими;

- износостойкость коленчатых валов восстановленных по технологии КазНАУ находится на уровне износостойкости новых валов, что обеспечивается добавлением в дугу ферромагнитной шихты.

- исходя из полученных данных эксплуатационных испытаний представляется возможным рекомендовать восстановление чугунных коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53 наплавкой по технологии КазНАУ, как предпочтительную перед другими способами наплавок.

Выводы по главе.

На основе анализа существующих способов восстановления изношенных деталей машины, выбран рациональный способ восстановления шеек чугунных коленчатых валов двигателя ЗМЗ-53 и разработан технологический процесс их восстановления, с применением полуавтоматической электродуговой наплавки под слоем флюса с введением в сварочную ванну ферромагнитного порошка [44]. Опираясь на известные теоретические положения сварочных процессов, разработаны режимы широкослойной наплавки шеек восстанавливаемых валов.

Для сравнительной оценки качества восстановленных валов, наплавка производилась по двум разным технологиям ГОСНИТИ и КазНАУ.

После восстановления наплавкой шеек опытной партии валов, на вырезанных из них образцов, методами металлографии исследованы микроструктура и микротвёрдость наплавленного слоя металла, переходной зоны и основного металла вала.

По результатам металлографического исследования структуры и микротвёрдости образцов были сделаны выводы о влиянии структуры наплавленного на шейки валов слоя металла и его твёрдости, на износостойкость и усталостную прочность чугунных коленчатых валов двигателя ЗМЗ-53.

- Было установлено, что образцы, наплавленные широкослойной наплавкой по технологии КазНАУ с добавкой ферромагнитной шихты, по износостойкости практически равнозначны образцам из новых, эталонных валов (превышение составляет порядка 4%).

- Относительная износостойкость образцов наплавленных по технологии ГосНИТИ (винтовая наплавка такой же проволокой, но с охлаждением потоком воздуха) ниже износостойкости шеек новых валов на 20 %.

По результатам натурных усталостных испытаний было установлено, что усталостная долговечность чугунных коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53, восстановленных широкослойной наплавкой по технологии КазНАУ с добавкой ферромагнитного порошка, ниже новых на 25 % (24,8), в то время, как тот же показатель для валов восстановленных по сравниваемой технологии ГосНИТИ, ниже новых на 35 % (34,5).

По результатам эксплуатационных испытаний чугунных коленчатых валов двигателя ЗМЗ-53, шейки которых восстанавливались по двум сравнительным технологиям – ГосНИТИ и КазНАУ, сделаны следующие выводы:

- установлено, что максимальные износы шатунных шеек коленчатых валов располагаются в плоскости осей цилиндров, совпадая с направлением действия наибольших сил инерции и нагружения деталей кривошипно-шатунной группы двигателя.

- износостойкость шеек чугунных коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53, восстановленных по технологии КазНАУ, находятся на уровне износа новых, эталонных валов, принятых за базу сравнения при наплавке по двум сравнительным технологиям.

- усталостная долговечность чугунных коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53, восстановленных по технологии КазНАУ, широкослойной электродуговой наплавкой под слоем флюса с введением в расплав ферромагнитного порошка, составляет более 75 % от уровня новых коленчатых валов, в то время, как по сравниваемой технологии ГосНИТИ, она составляет менее 65 %.

Глава IV Планирование и обработка результатов экспериментальных исследований по наплавке чугунных коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53 и их внедрение в производство

4.1 Методика планирования экспериментальных исследований.

Как известно [97] в большинстве случаев, эксперименты многофакторный. При проведении многофакторного эксперимента принимается либо классический, либо факторный план. Классический многофакторный эксперимент представляет собой последовательность однофакторных экспериментов, при которых все независимые переменные, кроме одной, принимаются постоянными. В таких экспериментах нельзя определить характер взаимодействия факторов между собой и их совместное влияние на выходной параметр.

Многофакторный эксперимент по факторному плану даст возможность изменения стратегии каждого этапа. Математическая теория эксперимента и его планирование, предусматривающая изменение всех исследуемых факторов по определённому плану и учитывающая их взаимодействие - качественно новый подход с применением ЭВМ для обработки результатов факторного, управляемого эксперимента. Планирование эксперимента резко повышает точность и уменьшает объём экспериментальных исследований [97, 98].

Прежде чем планировать и проводить эксперимент, необходимо выбрать критерий, т.е. параметр, по которому оценивается исследуемый объект и который связывает факторы в математическую модель. Правильно выбранный критерий оптимизации даёт исследователю чёткое представление о цели работы. Наиболее распространённым методом построения матрицы наплавочных экспериментов является метод случайного баланса [12].

В качестве критериев оптимизации процесса наплавки приняты твёрдость наплавленного слоя и напряжения при испытаниях восстановленных валов на усталостную прочность.

Перед тем как строить матрицу наплавочных экспериментов, следует назначить уровни варьирования факторами и закодировать их знаками (+) и (-). Для анализа выбраны восемь факторов: $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8$, каждый из которых варьируется на двух уровнях (+) и (-). В развернутом виде матрица наплавочных экспериментов приведена в таблице 4.1.

После построения матрицы проверялась ее пригодность [97, 98]. Матрица пригодна, если в ней нет двух однотипных столбцов (с одинаковыми или неодинаковыми знаками).

После реализации экспериментов выписывались их результаты. Для анализа результатов наплавочных экспериментов строились графики, рисунки 4.1, 4.2, 4.3, 4.4. Для этого по оси абсцисс наносились все факторы с их уровнями, а по оси ординат опытные значения критерия оптимитизации.

Для оценки эффектов факторов строились графики наплавки и наносились на них все точки с учетом уровня, на котором находился фактор в том или ином опыте.

В качестве среднего значения критерия оптимитизации для одного уровня принимается медиана. Перечень взятых на учет факторов представлен в таблице 4.2.

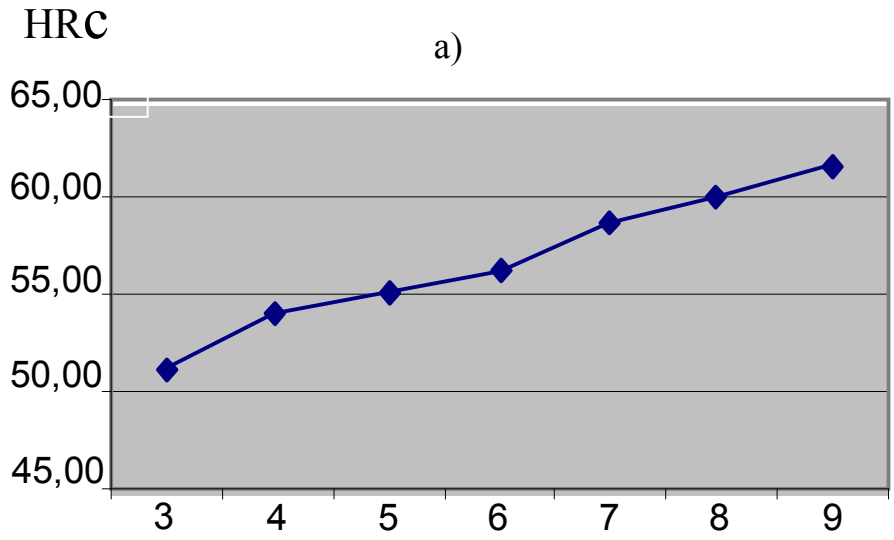
Таблица 4.1 – Матрица планирования наплавочных экспериментов

№ опыта	Ф а к т о р ы								Критерий оптимизации	
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	y_1	y_2
-	3	5	68	10	21	10	150	1	48	3,5
0	6	10	84	20	36	20	185	1,5	57	4,5
+	9	15	100	30	51	30	220	2	66	5,5
1	3	5	68	10	51	10	220	2	48	3,5
2	9	15	68	10	21	30	220	2	66	5,5
3	9	5	100	10	5	10	150	1	66	5,5
4	9	5	68	30	51	30	220	1	66	5,5
5	3	15	100	10	21	10	150	2	48	3,5
6	3	15	68	30	51	30	150	2	66	5,5
7	3	5	100	30	21	30	150	1	48	3,5
8	9	15	100	30	21	10	220	1	48	3,5
9	3	15	68	30	51	10	220	2	66	5,5
10	9	15	68	10	21	10	150	2	66	5,5

Таблица 4.2 – Факторы, влияющие на режим наплавки

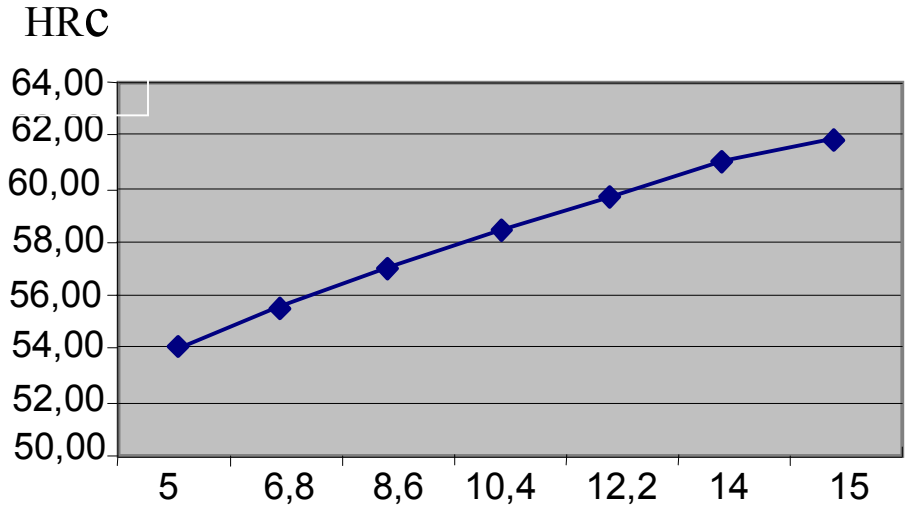
Фактор и его обозначение	Уровень факторов	
	-1	+1
x_1 - порошок алюминиевый, %	3	9
x_2 - порошок графитовый, %	5	15
x_3 - порошок железный, %	68	100
x_4 - скорость подачи проволоки, м/ч	10	30
x_5 - росход порошка, г/мин	21	51
x_6 - напряжение на дуге, В	10	30
x_7 - сила тока, А	150	220
x_8 - частота вращения детали, об/мин	1	2

а)



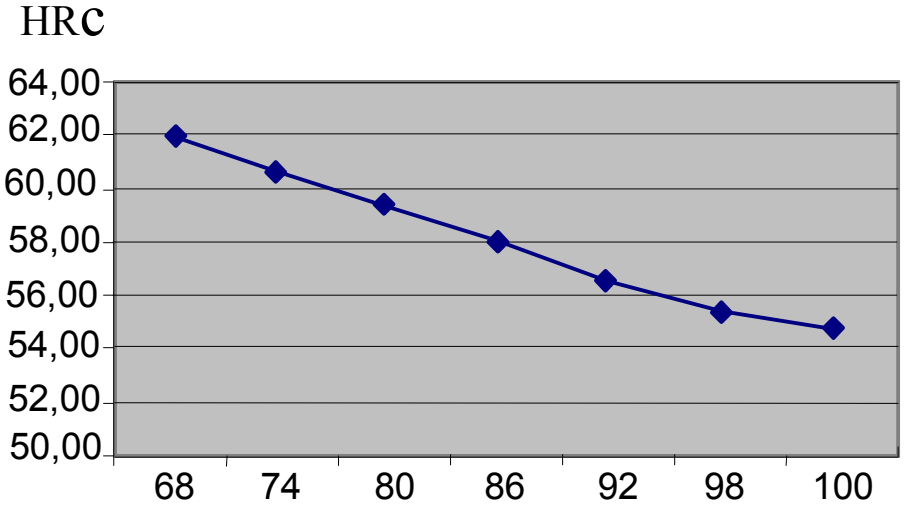
X_1 – содержание алюминия в порошке Al, % в порошке

б)



X_2 – содержание графита (углерод С, %) в порошке

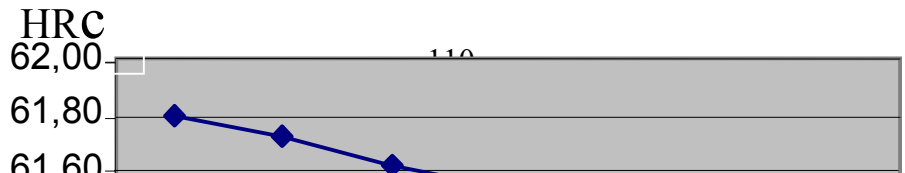
в)



X_3 – содержание железа Fe, % в порошке

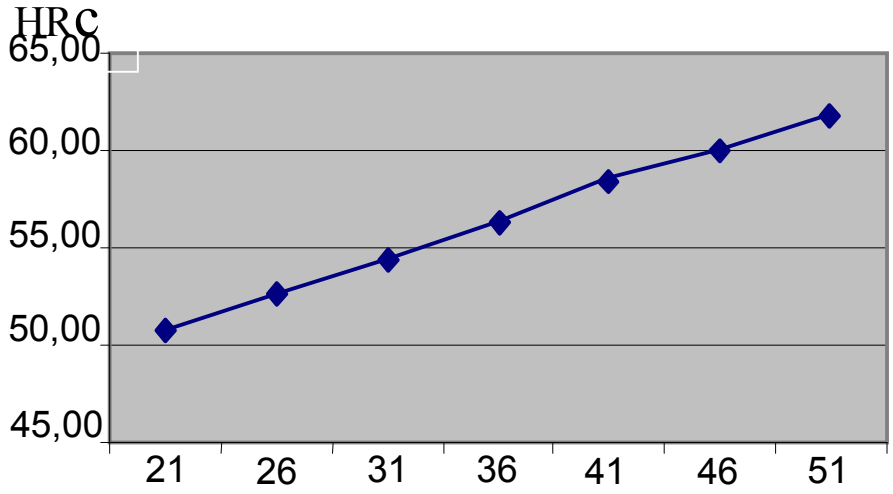
Рисунок 4.1 Графики зависимости твёрдости слоя наплавки шеек валов HRC (параметр y_1) от состава шихты в % вводимой при наплавке (факторы x_1, x_2, x_3)

а)



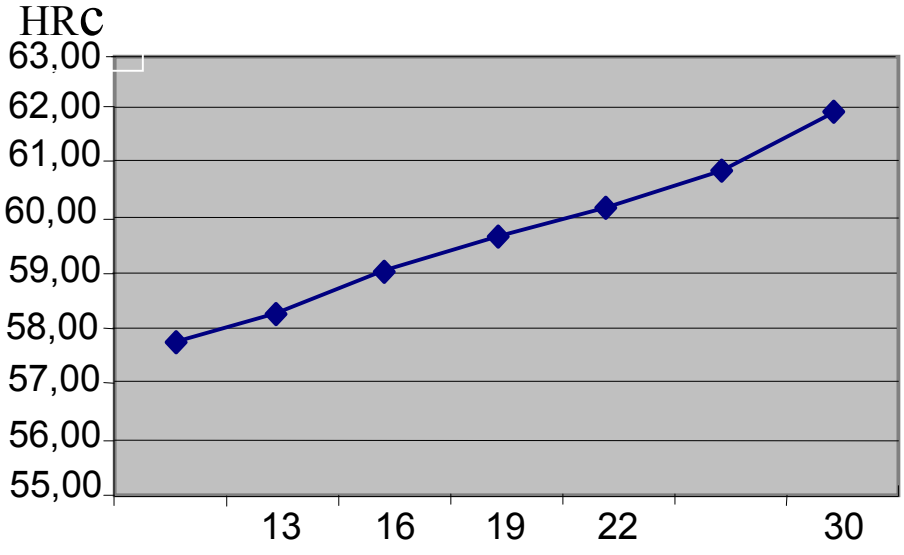
X_4 – скорость подачи проволоки V, м/ч

б)



X_5 – расход порошка в минуту, $\frac{г}{мин}$

в)

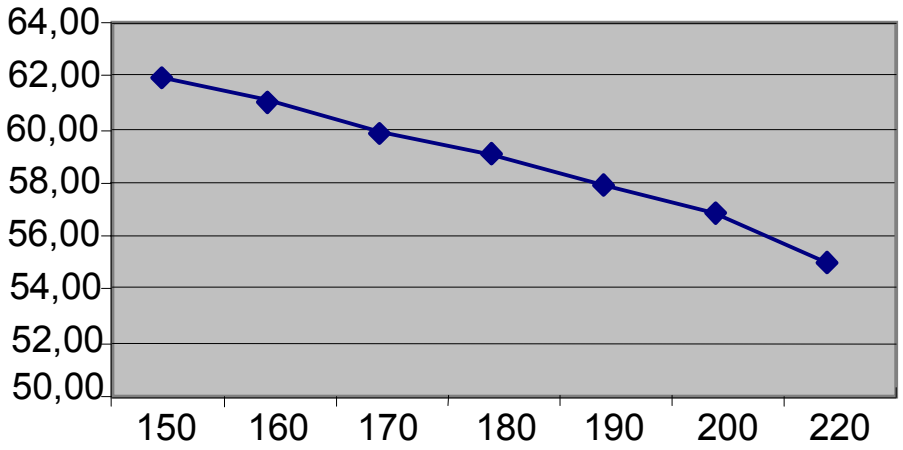


X_6 – напряжение на дуге U, В

Рисунок 4.2 – Графики зависимости твёрдости слоя наплавки шеек валов HRC (параметр y_1) от состава шихты в % вводимой при наплавке (факторы x_4, x_5, x_6)

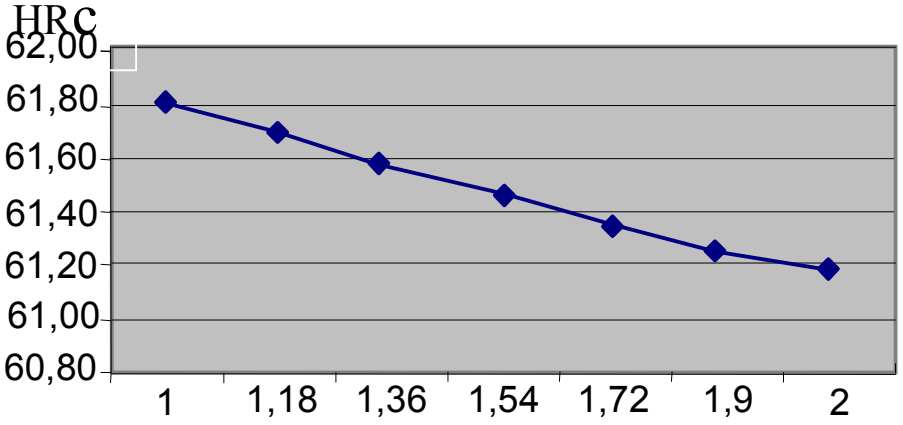
г)

HRC



X_7 – сила тока I, А

д)



X_8 – частота вращения детали *n*, об/мин

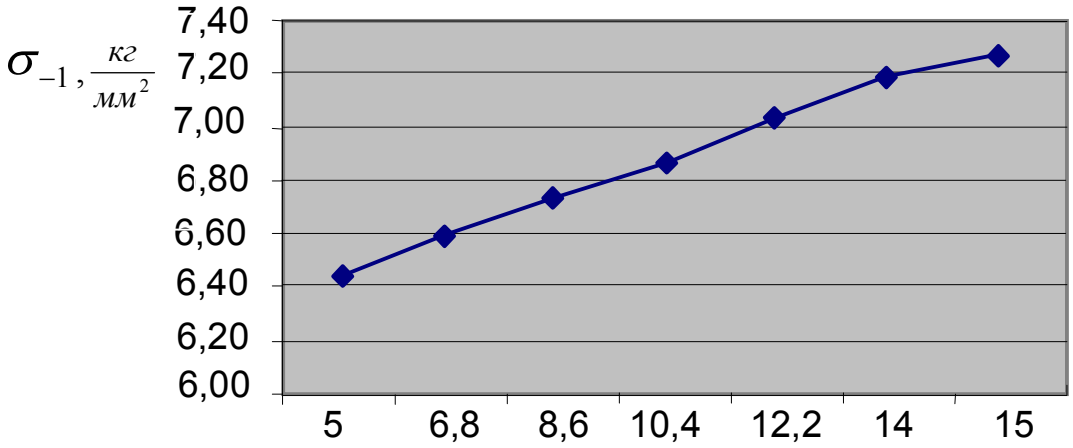
Рисунок 4.2 (продолжение) – Графики зависимости твёрдости слоя наплавки шеек валов HRC (параметр y_1) от состава шихты в % вводимой при наплавке (факторы x_7, x_8)

а)



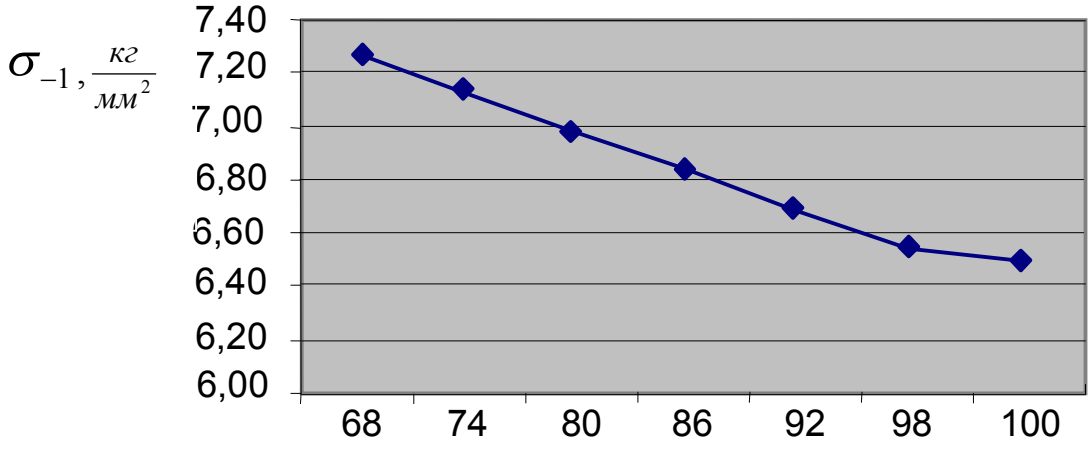
X_1 – содержание алюминия в порошке Al, % в порошке

б)



X_2 – содержание графита (углерод С, %) в порошке

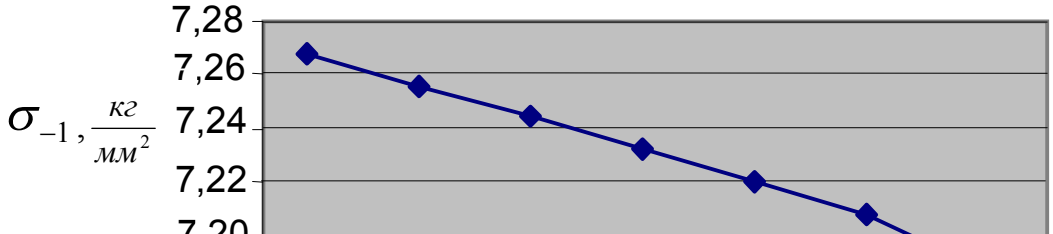
в)



X_3 – содержание железа Fe, % в порошке

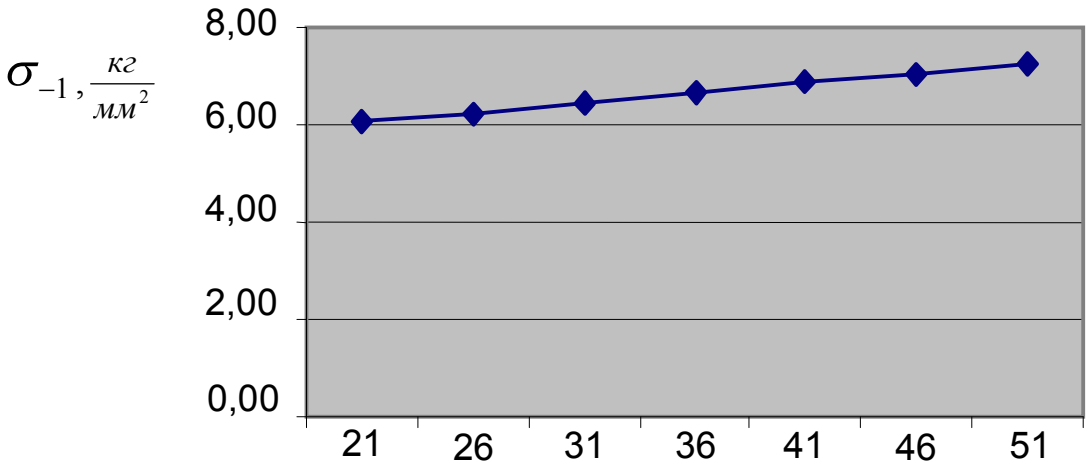
Рисунок 4.3 – Графики зависимости усталостных напряжений валов σ_{-1} (параметр y_2) от состава шихты в % вводимой при наплавке (факторы x_1, x_2 x_3).

а)



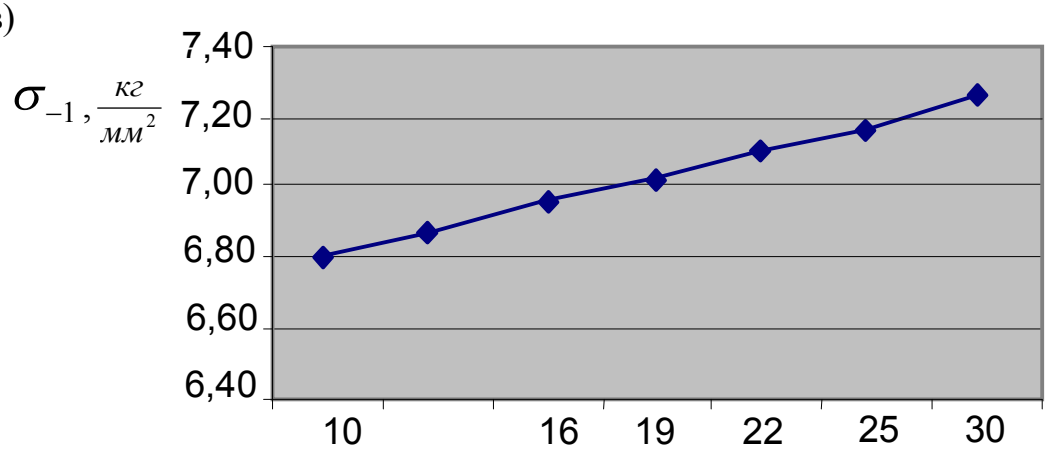
X_4 – скорость подачи проволоки V, м/ч

б)



X_5 – расход порошка в минуту, $\frac{г}{мин}$

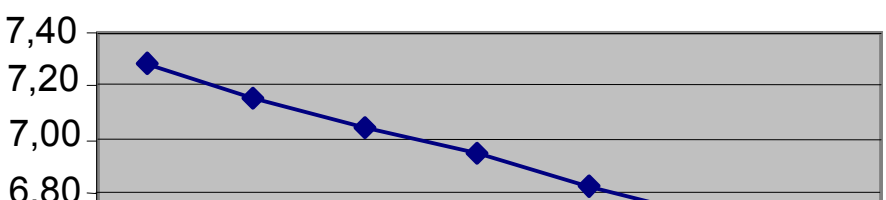
в)



X_6 – напряжение на дуге U, В

Рисунок 4.4 – Графики зависимости усталостных напряжений валов σ_{-1} (параметр y_2) от состава шихты в % вводимой при наплавке (факторы x_4, x_5 x_6).

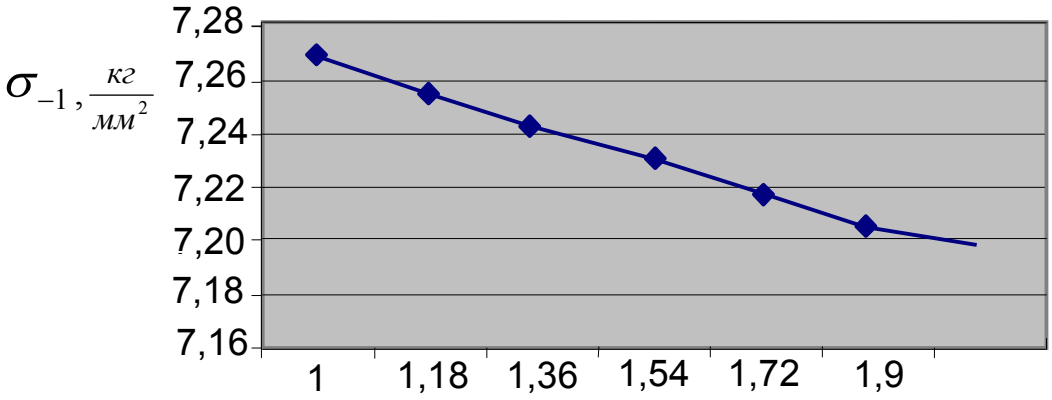
г)



$\sigma_{-1}, \frac{кг}{мм^2}$

X_7 – сила тока I, А

д)



X_8 – частота вращения детали *n,* об/мин

Рисунок 4.4 (продолжение) – Графики зависимости усталостных напряжений валов σ_{-1} (параметр y_2) от состава шихты в % вводимой при наплавке (факторы x_7, x_8).

4.2 Обработка результатов эксперимента

Построение математической модели по результатам эксперимента производится в следующей последовательности [98]:

- выбирается вид уравнения регрессии;
- проводится эксперимент и оцениваются его результаты;
- определяются коэффициенты уравнения регрессии и проверяется их значимость;
- проверяется соответствие (адекватность) полученной модели исследуемому процессу (объекту).

Например, требуется построить модель процесса зависящего от к независимых переменных факторов – x_i, т.е. найти отклик, как функцию $y=y(x_i, a_i)$, где a_i – неизвестные постоянные параметры (i=1, 2, … к).

Принимая средние значения факторов за их условные нулевые (основные) уровни Δx_i и задаваясь шагами их варьирования переводим их значения в безразмерную кодированную форму. Процесс исследуется на основе полного многофакторного эксперимента ПФЭ, в котором для составления плана-таблицы эксперимента каждый из к-факторов варьируется на двух уровнях каждый p=2, $N=P^k \rightarrow$ ПФЭ-$N=2^к$ и введена фиктивная переменная $x_0=1$, причём каждый опыт (серия измерений) повторяется u – раз, см. таблицу 4.1.

Для исключения грубых погрешностей статистического ряда измерений имеется несколько методов. В случае малой выборки, подчиняющейся закону нормального распределения, критериями появления грубых погрешностей могут быть:

$$\beta_1 = \left(x_{\max} - \bar{x}\right) \Big/ \left[\sqrt{(n-1)/n} \bullet \sigma\right]; \tag{4.1}$$

$$\beta_2 = \left(\bar{x} - x_{\min}\right) \Big/ \left[\sqrt{(n-1)/n} \bullet \sigma\right], \tag{4.2}$$

где x_{max}, x_{min} – наибольшее и наименьшее из N измерений.

Для определения грубых погрешностей из таблиц находятся β_{max} и β_{min} в зависимости от доверительной вероятности p(t). Если $\beta_1 > \beta_{max}$, то x_{max} – грубая погрешность, и она исключается из статистического ряда. При $\beta_2 < \beta_{min}$ исключается x_{min}. Затем определяются новые значения $\bar{x}$ и σ из n – 1 или n – 2 измерений.

В качестве первого приближения принимаем линейную модель процесса без учёта взаимодействия факторов, т.е. уравнение вида $y=y(x_i, a_i)$ или

$$\bar{y}_n = b_0 + \sum\nolimits_i b_i \overline{x_0} + \ldots , \tag{4.3}$$

где $x_0=1$.

Проводим эксперимент согласно составленному плану и оцениваем его результаты.

В каждой строке плана отмечаем наибольшее (наименьшее) значение функций отклика – y_{un}. Затем ищем среднее значение функций отклика в каждой строке плана без учёта сомнительного результата:

$$\overline{y} = \frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^{n-1} y_{un} \ , \tag{4.4}$$

и определяем среднее квадратичное отклонение от его значения (как центра группирования) по формуле:

$$S_n = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^{n-1} \left(y_{un} - \overline{y_n} \right) z \right]^{z<2} . \tag{4.5}$$

Далее определяем расчётное значение критерия Стьюдента для каждой строки плана по формуле:

$$t_{pn} = \left(\left| y_{un}^{n} - \overline{y_n} \right| \Big/ S_n \right) < t_m , \tag{4.6}$$

где $t_т$ – табличное значение критерия Стьюдента, которое ищется по таблицам распределения при числе степеней свободы f=n-1 и уровне значимости (доверительном интервале) q=0,05. Если $t_р > t_т$, то значение – y_{un} не согласуется с данными каждой строки и из дальнейших расчётов исключается.

После проверки однородности измерений во всех строках плана подсчитываются средние значения функции отклика - $\overline{y_n}$ и заносятся в последнюю графу. Далее производится расчёт построчных дисперсий и проверка их однородности. Построчные дисперсии рассчитываются по формуле:

$$S_n^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^{n=1} \left(y_{un} - \overline{y_n} \right)^2 . \tag{4.7}$$

Затем подсчитывается сумма дисперсий по всем строкам плана $\sum_{u}^{n} S_n^2$ и определяется расчётное значение критерия Кохрена по формуле:

$$G_p = \left(S_{n\min}^{z} \Big/ \sum_{u}^{n} S_n^2 \right) < G_m \ , \tag{4.8}$$

где $G_т$ – табличное значение критерия Кохрена, которое определяется при степенях свободы f_1=n-1 и f_2=N и уровне значимости (доверит. вероятности 0,95) q=0,05 по таблице распределения Кохрена [99, 100].

При $G_p < G_т$ дисперсии считаются однородными, свидетельствующие о том, что в статистических данных нет случайных грубых ошибок и измерения во всех строках плана имеют примерно одинаковую точность.

Если $G_т > G_p$, то предположение (гипотеза) об однородности дисперсий не подтверждается. В этом случае нужно принимать неформализованное решение, чтобы добиться выполнения условия $G_p < G_т$. Один из путей – переход к другому виду функций отклика. В тех случаях, когда число измерений в различных строках плана различно, применяется критерий Бартлета.

При одинаковом числе параллельных опытов (серий измерений) во всех строках плана, расчёт дисперсий воспроизводимости производится по формуле:

$$S_y^2 = \frac{1}{N}\sum_u^n S_N^2 . \qquad (4.9)$$

Оценка средних значений отклика в отдельных точках факторного пространства и проверка их значений производится также по критерию Стьюдента:

$$t = \left[\left(\bar{y}_{N\max} - \bar{y}_{N\min} \right) \Big/ S_y \sqrt{n_{\max}^{-1} + n_{\min}^{-1}} \right] > t_m , \qquad (4.10)$$

где $t_т$ – табличное значение критерия Стьюдента, определяемое по числу степеней свободы $f = n_{max} - n_{min}$ и уровней значимости (доверит. вероятность 0,095) q=0,5.

При $t_p > t_T$ различие между значениями отклика в различных точках плана существенно. Если $t_p < t_T$ средние значения $\overline{y_N}$ отличаются статистически незначимо. В этом случае экспериментальные данные нельзя признать удовлетворительными и необходимо поставить такой эксперимент, в котором значения отклика в отдельных точках плана отличались бы более существенно, что может быть достигнуто изменением масштабов переменных, интервалов варьирования факторов, применением планов второго порядка или перенесением области варьирования в другое место области исследования.

Определение коэффициентов уравнения регрессии производится по формуле:

$$b_i = \left(\sum_i^n \bar{y}_n x_{in} \right) \Big/ \sum_i^n x_{iN}^2 . \qquad (4.11)$$

А их статистическая значимость по формуле:

$$S_b = S_y \Big/ \sqrt{Nk} . \qquad (4.12)$$

Расчётное значение критерия Стьюдента:

$$t_p = \left(\left| b_i \right| \Big/ S_{b_i} \right) > t_m , \qquad (4.13)$$

где t_T – табличное значение критерия определяется при степени свободы $f_{bi}= f_y = N (n-1)$ и уровне значимости q=0,05 по таблицам распределения Стьюдента.

При $t_p>t_T$ все коэффициенты уравнения регрессии считаются значимыми, т.е. b_i не равно нулю. Если $t_p< t_T$, то предположение (гипотезу) о возможном равенстве коэффициента b_i нулю следует принять и исключить из уравнения регрессии соответствующий член. Это значит, что исключаемый член содержащий фактор x_i ссущественно не влияет на отклик $\bar{y}$. Это утверждение может оказываться неверным даже при выполнении условия $t_p< t_T$, так как иногда коэффициент b_i оказывается малым из-за малого интервала варьирования J_i. Поэтому перед исключением $b_i x_i$ из уравнения надо выяснить причину малости коэффициента b_i. После проверки значимости коэффициентов b_i уравнение регрессии принимает вид:

$$\overline{y_n} = b_o + \sum_i b_i \overline{x_i} + \dots .$$

4. Проверка адекватности выбранного уравнения регрессии первоначально принятой математической модели исследуемого процесса производится по критерию Фишера.

Для чего вначале для каждой точки плана эксперимента определяются значения отклика $\bar{y}_N$, вычисленное по уравнению регрессии. Затем определяется дисперсия адекватности:

$$S = \frac{n}{n-l} \sum_i^n \left(\overline{y_N} - \overline{y_N}\right)^2, \qquad (4.14)$$

где $\overline{y_n}$ - среднее значение отклика берётся из последней графы плана таблицы эксперимента;

i – число значимых коэффициентов регрессии.

Расчётное значение критерия Фишера определяется по формуле:

$$F_p = \left(S_{aq}^2 \Big/ S_y^2\right) < F_T . \qquad (4.15)$$

А табличное $F_т$ по двум степеням свободы $f_1=N-1$ и $f_2=N\cdot(n-1)$ и уровню значимости q=0,05 по таблицам распределения Фишера [98].

При $F_p < F_т$ делается заключение об адекватности принятой модели исследуемому процессу. При $F_p> F_т$ считается, что выбранная модель не соответствует исследуемому объекту или процессу. В этом случае необходимы следующие неформальные решения (творческие действия):

- уменьшить интервалы варьирования J_i для всех или некоторых факторов;

- увеличить число параллельных опытов и в каждой строке плана эксперимента;

- ввести новые, раннее не учтённые факторы;

- учесть кроме парных взаимодействий (первого порядка) взаимодействия факторов более высокого порядка;

- изменить функцию отклика.

4.3 Методика оптимизации режима наплавочного процесса

На стадии разработки технологии восстановления коленчатого вала на первом этапе всегда ставится задача определения оптимального режима наплавки, обеспечивающего требуемую толщину наплавленного покрытия с минимальном дефектным слоем. Для этой цели указанная задача обычно решается на основе пробных наплавок, что приводит к большим затратам труда и материальных средств.

Оптимальный режим наплавочного процесса это такой режим, который обеспечивает заданные исходные технические требования (показатели) металлопокрытия с минимальными затратами на наплавку и механическую обработку. В соответствии с данным определением, для решения указанной задачи в общем виде необходимо установить основные показатели, характеризующие качество формирования наплавленного слоя и технико-экономические показатели его получения.

Качество наплавленной детали во многом определяется режимами наплавки, которые характеризуются величиной сварочного тока, напряжением, родом тока и его полярностью, скоростью сварки, диаметром и скоростью подачи электродной проволоки. К дополнительным параметром режима относится вылет электрода по отношению к наплавляемой поверхности, марка порошка.

Параметры режима наплавки выбирают исходя из толщины слоя наплавляемого металла, размеров детали, требуемый формы наплавляемого валика.

Силу сварочного тока ориентировочно можно определить по эмпирической формуле [33]:

$$J_{СВ} = 110d + 10, \qquad (4.16)$$

где d – диаметр электрода, мм.

Скорость наплавки определяется по формуле:

$$V_{Н} = \frac{\alpha_{Н} J_{СВ}}{60M}, \qquad (4.17)$$

где $\alpha_{н}$ - коэффициент наплавки, $\frac{г}{А \cdot ч}$;

$J_{св}$ - сила сварочного тока, А;

М – масса 1 м металла наплавки, г;

Скорость подачи электродной проволоки:

$$V_n = \frac{4\alpha_H J_{CB}}{60\pi d^2 \gamma} \quad , \tag{4.18}$$

где d- – диаметр электрода, мм;

γ - плотность наплавленного металла, $\frac{г}{см^3}$.

Частота вращения наплавляемой детали:

$$n = \left[\frac{250 V_n d^2 V_n d^2}{\Delta s D} \right], \tag{4.19}$$

где V_n - скорость подачи электродной проволоки, $\frac{м}{мин}$;

Δ - толщина слоя наплавки, мм;

s – ширина наплавки, мм;

D- диаметр восстанавливаемой детали, мм;

η - коэффициент наплавления.

При наплавке автомобильных деталей, особенно таких, у которых длина значительно превышает диаметр наплавляемой поверхности, необходимо стремиться к минимальной глубине проплавления основного металла. Это позволяет уменьшить деформацию детали и зону термического влияния, а также снизить вероятность образования трещин в наплавленном металле. Поэтому при выборе режимов наплавки выбирают, как правило, минимально допустимый сварочный ток. Кроме того, увеличение диаметра электродной проволоки при неизменном сварочном токе также уменьшает глубину проплавления и увеличивает ширину шва в связи с эффектом блуждания дуги [101, 102].

При наплавке на постоянном токе глубина проплавления будет зависеть и от полярности, что объясняется различной температурой на катоде и аноде дуги. При наплавке на постоянном токе обратной полярности (минус на деталь) глубина проплавления на 40-50% меньше, чем при наплавке током на прямой полярности. В определенных пределах глубину проплавления можно изменять, регулируя вылет электрода. С увеличением вылета электрода интенсифицируется его подогрев и соответственно скорость плавления, в результате чего толщина расплава под дугой увеличивается, и глубина проплавления уменьшается.

Ширину наплавляемого валика регулируют выбором диаметра электродной проволоки и изменением напряжения дуги. При увеличении напряжения возрастает длина дуги, в результате чего увеличивается ее подвижность и возрастает доля теплоты дуги, расходуемой на расплавление

порошка. При этом растет ширина валика наплавленного металла, а глубина проплавления остается практически постоянной.

Построение математической модели по результатам эксперимента.

При экспериментальных исследованиях в общем случае определению подлежат аналитические зависимости между переменными – формулы и коэффициенты этих формул. Формулы могут быть получены либо теоретически, либо путём обработки экспериментальных данных. В последнем случае они называются эмпирическими [99].

Поскольку физические эксперименты проводятся с погрешностями, то функциональная зависимость (формула) не может быть получена однозначной. Поэтому нужно стремиться получить наиболее простую приближённую формулу. Самой простой в построении и использовании является линейная математическая модель вида:

$$y_n = a_o + \sum_i a_i x_i \quad ; \tag{4.20}$$

и степенная вида:

$$y = a_o x_i^{a_1} . \tag{4.21}$$

Причём степенная зависимость более универсальна, так как аппроксимирует нелинейные связи.

Значительно реже используется полулогарифмическая функция вида:

$$y_n = a_o + \sum_i a_i \lg x_i ; \tag{4.22}$$

и экспоненциальная вида:

$$y = a_o e^{\sum a_i x_i} . \tag{4.23}$$

Коэффициенты $a_{0,} a_i$ ($i=\overline{1,n}$) эмпирических уравнений определяется так же, как в случае парной корреляции, методом наименьших квадратов.

Для этого, например, в случае степенной функции она вначале логарифмируется. Затем делается замена переменных $x_i=lg_i$ и тем самым степенная функция вида (4.21) заменяется линейной вида (4.20) коэффициенты которой определяются решением системы уравнений, получаемой по методу наименьших квадратов.

Наиболее важным вопросом корреляционного анализа является установление функциональной связи между зависимым показателем (откликом) параметром – аргументом (фактором), аналитически описывающей эту связь теоретической линией регрессии. Процесс нахождения аналитической

зависимости (теоретической линии регрессии) заключается в обоснованном выборе аппроксимирующей кривой и расчёте параметров её уравнения b_i. Линия регрессии представляет собой плавную кривую (в частном случае прямую линию), описываемую математически уравнением (моделью) того или иного вида.

Чаще всего для расчёта многих показателей, механизмов и машин используются линейная $y = a_0 + a_i x$, степенная $y = a_0 x^{ai}$, гиперболическая $y = a_0 + a_1 x^{-1}$ и квадратичная $y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2$ функции. Причём подбор вида кривой регрессии нельзя сводить только к задаче интерполирования, когда по таблице значений функции строят её аналитической выражение. Например, если имеются значения функции в n+1 точках, а именно $y_i = f(x_i)$, где i = 0, 1, 2, 3, …n, то эту функцию можно описать в первом приближении многочленом n-й степени (на основании теоремы Вейерштрасса):

$$y = a_o + a_1 x + a_2 x^2 + ... a_n x^n, \qquad (4.24)$$

где параметры многочлена находятся с помощью интерполяционной формулы Лагранжа. Причём линия, построенная по уравнению Лагранжа (4.24), будет в точности проходить через заданные точки (узлы интерполяции) и поэтому считается, что интерполяционный многочлен подробно воспроизводит эмпирическую зависимость. Однако эмпирические зависимости обычно отражают не только закономерные, но и случайные изменения переменных. Поэтому интерполяционное уравнение (4.24), повторяющее случайные изменения параметров искажает вид исследуемой зависимости. При нахождении вида кривой регрессии решается задача не интерполирования, а задача сглаживания или аппроксимации. Поэтому стремятся найти общую тенденцию исследуемой зависимости и одновременно сгладить незакономерные, случайные колебания, связанные с влиянием различных побочных (неучитываемых) факторов. Для выбора и обоснования типа кривой регрессии нет универсального метода. Существует несколько основных путей решения этой задачи, каждый из которых обычно используется неизолированно, а в сочетании с другими.

Логический анализ помогает уяснить общий характер зависимостей между переменными, а также помочь сделать выводы о наличии или отсутствии корреляции между различными факторами. Следует отметить, что зависимости основных параметров машин и механизмов от производственного, технологического процесса имеют нелинейный характер и во многих случаях вполне точно описываются степенной, гиперболической параболической и др.функциями [103, 104].

Для определения возможности выражения функции $y=y(x_i, a_i)$ в виде линейной зависимости можно использовать коэффициент корреляции:

$$r = \left(s_{xy} / s_x \cdot s_y \right) < 1 \ . \qquad (4.25)$$

При $r \geq 0{,}5$ теснота связи считается удовлетворительной. При $r \prec 0{,}5$ регрессию следует считать нелинейной.

Пример. Пусть заданы результаты двух серий измерений x_i, y_i ($i=\overline{1,n}$). Определить среднее значение $\overline{x,y}$ рассеивания – среднеквадратические отклонения s_y, s_x, ковариацию s_{xy} и коэффициент корреляции r. Они вычисляются по формулам:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_i^n x_i s_x = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_i^n x_i^2 - \left[\frac{1}{n}\sum_i^n x_i\right]^2}; \quad (4.26)$$

$$S_{xy} = \frac{1}{n}\sum_i^n x_i y_i - \frac{1}{n^z}\sum_i^n x_i \sum_i^n y_i . \quad (4.27)$$

Формулы для вычисления $\overline{y_i}$ s_y аналогичны формулам вычисления $\overline{x_i} s_x$.

После обработки экспериментальных данных, полученных по теории планирования эксперимента, нами установлена эмпирическая формула математической модели усталостной прочности относительно рассматриваемых факторов: x_1, x_2, … x_8.

Разработанную многофакторную регрессионную модель можно использовать также и для определения оптимального уровня исследуемого показателя методами математического программирования.

Рассмотрим методику решения задачи в указанной постановке на примере определения максимального уровня усталостной прочности, а также по рассматриваемым фактором.

Регрессионное уравнение, полученное нами по программе Linbra, определяющее связь между твердостью и формирующими её факторами, имеет вид:

$$y_1 = 60{,}44 + 1{,}737x_1 + 0{,}758x_2 - 0{,}217x_3 - 0{,}032x_4 + 0{,}368x_5 + 0{,}205x_6 - 0{,}099x_7 - 0{,}632x_8 . \quad (4.28)$$

Аналогично получено уравнение регрессии, связывающее усталостную прочность с определяющими её факторами:

$$y_2 = 4{,}882 + 0{,}193x_1 + 0{,}084x_2 - 0{,}024x_3 - 0{,}004x_4 + 0{,}041x_5 + 0{,}023x_6 - 0{,}011x_7 - 0{,}07x_8 \quad (4.29)$$

Далее задача решалась на компьютере в среде «Excel» - методом поиск-решения. Для этого составляется матричная таблица на основании выше описанной модели.

Таким образом, формально целью эксперимента являлось определение численных значений коэффициентов уравнений регрессии, а для определения оптимальных условий протекания процессов, находились значения факторов x_1, x_2, … $x_к$ соответствующие экстремуму функций цели или целевых функций (4.28) и (4.29).

4.4 Внедрение разработанной технологии восстановления чугунных коленчатых валов

Путем маркетинговых исследований выявлены места внедрения (предприятия) и реализованы в производстве технология восстановления коленчатых валов. При этом учитывались следующие факторы:

- направление деятельности предприятия;
- наличие наплавочного оборудования и возможность его переналадки под восстановление коленчатых валов по разработанной технологии;
- наличие площадей для монтажа оборудования.

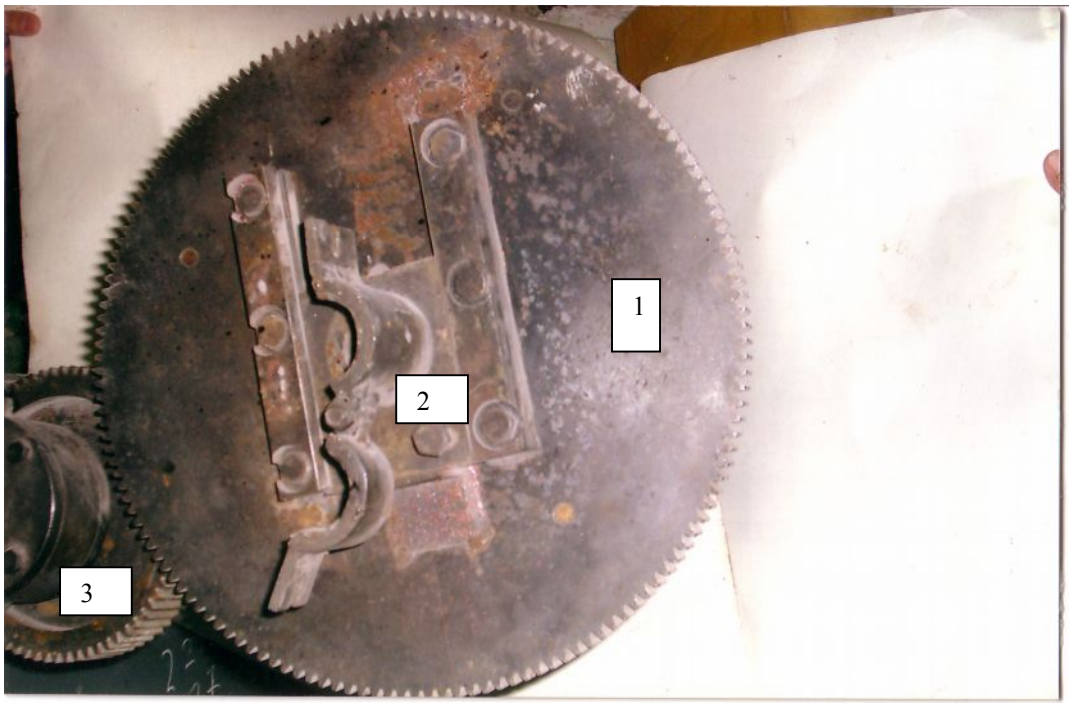
Выявлено, что в городе Алматы восстановлением непосредственно коленчатых валов занимаются 3 предприятия. Два из них восстанавливают коленчатые валы лазерной наплавкой, оборудование которой для использования в нашей технологии невозможно. Одно предприятие занимается восстановлением плазменным напылением, что также неприемлемо для переоборудования под нашу технологию. В Алматинской области прежде всего обследовались бывшие ремонтные предприятия - Тургенский РМЗ, Талгарское РО СХТ. Однако эти предприятия в настоящее время сменили как форму собственности, так и направление деятельности. Путем опроса специалистов было выявлено, что восстановление коленчатых валов различными видами наплавки производилось в Талдыкорганском регионе.

При обследовании предприятий г. Талдыкоргана установили, что в городе работали два предприятия восстанавливающих коленчатые валы, это «Агротехсервис» и ТОО «Мади». Приобретенная у ТОО «Мади» наплавочная установка У-653А, стандартная, выпущенная в 1992г заводом «Ростехоснастка». Недостатком этой установки является скручивание вала из-за высоких температур в процессе наплавки. С целью устранения этого дефекта проведена модернизация станка под наплавку коленчатого вала двигателя ЗМЗ-53. Модернизация станка заключается в подведении вращающего момента к задней бабке. На задней бабке устанавливается зубчатый маховик.

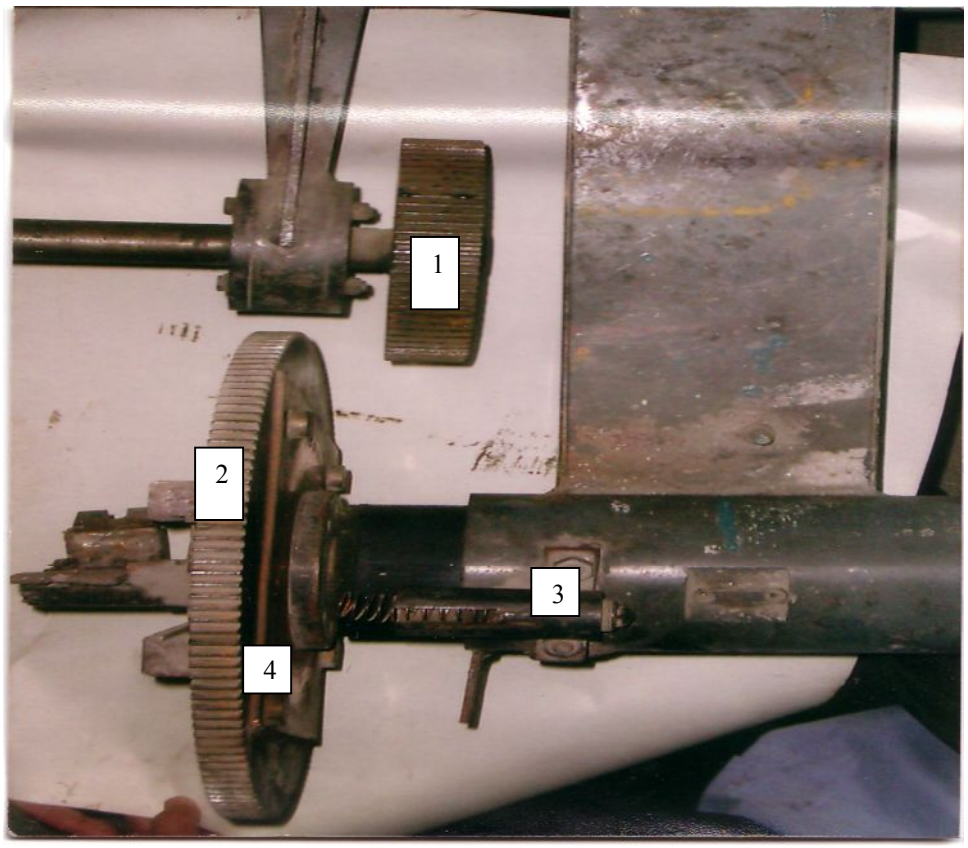
Вращающий момент передается от маховика установленного на коробке передач (рисунок 4.5).

На маховике 2 с тыльной стороны установлена пластина из меди М2 для скользящего токоподвода 3. Весь комплект дополнительного вала с шестернями и кронштейнами показан на рисунке 4.6

Таким образом, была модернизирована установка У-653А под наплавку коленчатых валов ГАЗ-53 с дополнительным приводом на маховик, установленный вместо задней бабки исключающий скручивание коленчатого вала в процессе наплавки, а также установлен токоподвод к маховику задней бабки, повышающий качество наплавки последних шеек (коренных и шатунных) коленчатого вала (рисунок 4.6).



1-маховик, 2- центросместитель, 3-шестерня.
Рисунок 4.5 – Маховик с центросместителем.



1-шестерня, 2- маховик (задний), 3- токоподвод, 4- пластина.
Рисунок 4.6 – Задний маховик с тоководом.

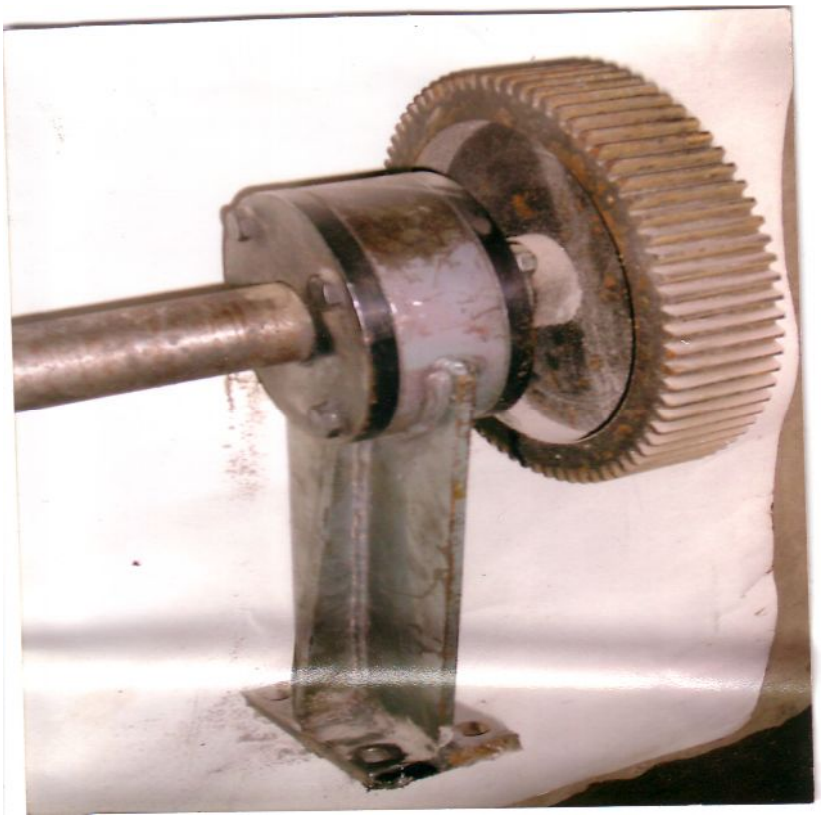


Рисунок 4.7 – Шестерня привода маховика на задней бабке



1-кронштейн, 2-шестерня передней бабки, 3-шестерня задней бабки.
Рисунок 4.8 – Дополнительный приводной вал.

В соответствии с программой НИР в хозяйство передана техническая документация по восстановлению коленчатых валов и технико-экономическое обоснование разработанной технологии.

Результаты технологических разработок и рекомендаций для восстановления деталей из высокопрочного чугуна внедрены на следующих предприятиях: ТОО «Коксу-Куат», с.Теректы, Енбекши Коксуйского раойна, Алматинской области; ТОО «БакНурТранс» г. Алматы.

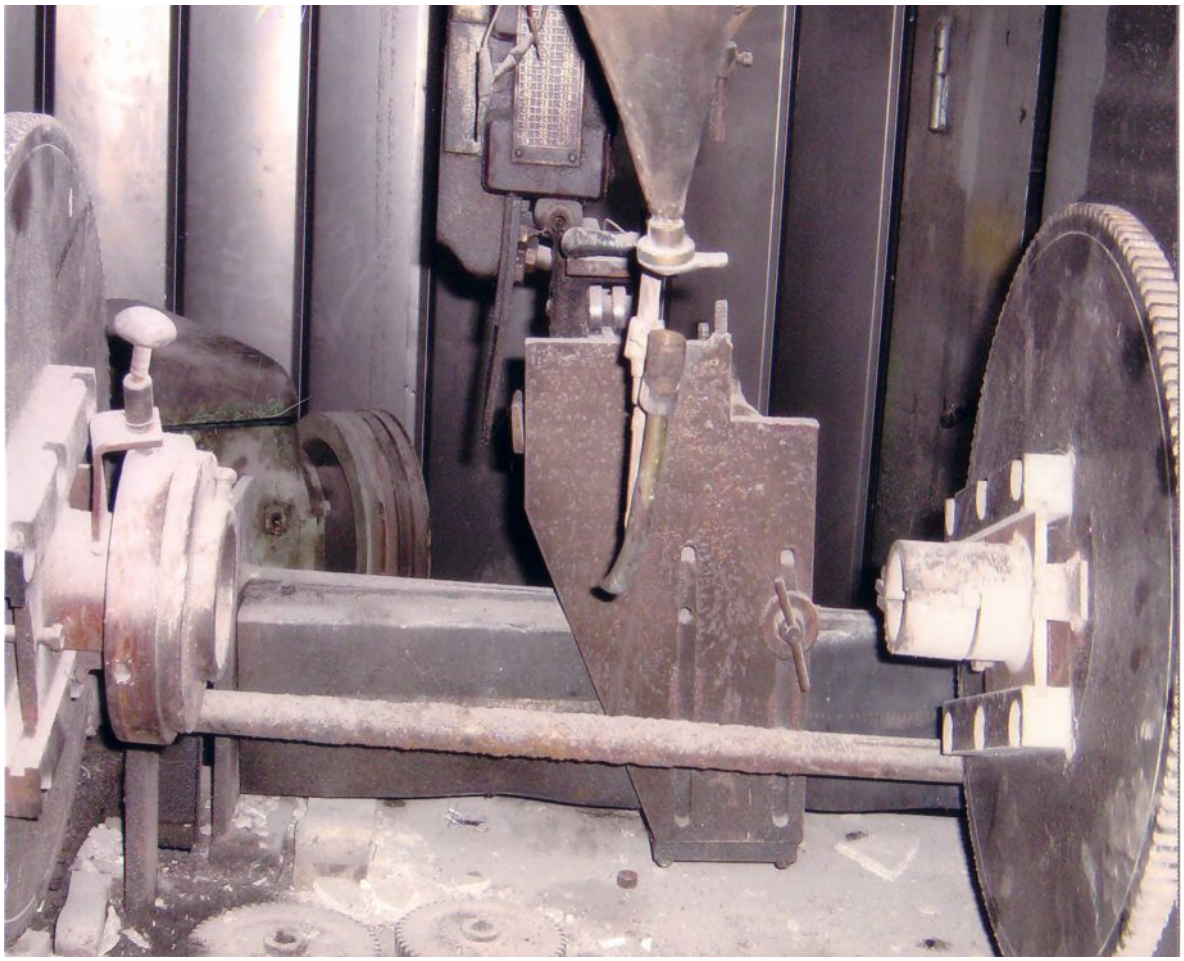


Рисунок 4.9 Наплавочная установка У-653

4.5 Определение экономической эффективности при восстановлении чугунных коленчатых валов по разработанной технологии.

Экономическая эффективность разработанной новой технологии восстановления чугунных коленчатых валов определяется по ее влиянию на послеремонтный ресурс, по снижению затрат при использовании восстановленных коленчатых валов вместо покупки новых [105, 106].

Различают два вида экономической эффективности применения новых технологии: народнохозяйственную (бюджетную) с учетом интересов всего народного хозяйства и хозрасчетную (коммерческую) непосредственно у потребителя.

Эффективность определяется с учетом совокупных затрат на создание и внедрение новой технологии при использовании новой технологии на предприятиях взамен существующей.

При экономической оценке определяют общую (абсолютную) и сравнительную эффективность технологии. Общая эффективность показывает целесообразность применения новой технологии, а сравнительная позволяет

определить какие из наиболее эффективных вариантов новых технологий, по сравнению с базовой следует применять.

Общую (абсолютную) экономическую эффективность предлагаемой технологии восстановления чугунных коленчатых валов автотракторных двигателей рассчитывают путем определения абсолютного размера прибыли, получаемой при внедрении технологии и ее относительного размера, т.е. нормы прибыли (рентабельности).

Абсолютная величина прибыли определяется по формуле:

$$П = Ц - С \qquad (4.30)$$

где, П – абсолютная величина прибыли, тг;

Ц – стоимость восстановленного коленчатого вала в ценах реализации, тг;

С – себестоимость восстановленного коленчатого вала, отражающая совокупные затраты на основные фонды, оборотные средства и трудовые ресурсы, тг.

Поскольку в настоящее время затруднен учет автотракторной техники в данной местности, то расчеты экономической эффективности произведены из расчета на одну тысячу коленчатых валов. Стоимость реализации коленчатого вала ГАЗ-53, восстановленного с применением предлагаемой технологии составляет – Ц = 6100тыс.тг. Себестоимость восстановленного коленчатого вала с учетом затрат и накладных расходов составляет – 4,000тг, тогда

С = 4,700 ·1000 = 4700 тыс.тг.

Полученные исходные данные позволяют рассчитать абсолютную величину прибыли при использовании новой технологии

П = 6100 – 4700 = 1400 тыс.тг.

Тогда норма прибыли (рентабельность) составит:

$$Н_{пр} = \left(\frac{П}{С}\right) 100 = \left(\frac{1400}{4700}\right) 100 = 29{,}7\ \%. \qquad (4.31)$$

Полученная норма прибыли свидетельствует о достаточно высоком уровне рентабельности предлагаемой технологии.

Годовой экономический эффект при сравнительной оценке лазерной технологии и технологии восстановления коленчатого вала магнитной шихтой по показателю «прирост прибыли» определяется по формуле:

$$Э_{пр} = \left[\left(\frac{П_Н}{А_Н}\right) - \left(\frac{П_Б}{А_Б}\right)\right] \cdot A_Н, \qquad (4.32)$$

где $Э_{пр}$- годовой прирост прибыли, тг;

$П_Б$ - годовая прибыль по новому и базовому варианту, тг;

$А_Б$ - годовой объем восстановленных коленчатых валов, шт;(из расчета 1000 коленчатых валов).

Тогда

$$Э_{пр} = \left[\left(\frac{1400}{1000}\right) - \left(\frac{920}{1000}\right)\right] \cdot 1000 = 480 тыс.тг.$$

Годовой экономический эффект за счет влияния комплекса факторов определяется по формуле:

$$Э_{ГР} = \left[\left(Ц_Н \cdot A_Н - \frac{C_Н}{A_Н}\right) - \left(Ц_Б \cdot A_Б - \frac{C_Б}{A_Б}\right)\right] \cdot A_Н , \quad (4.33)$$

где $Э_{ГР}$ - годовой экономический эффект, тг;

$Ц_Б$- цена реализации продукции по новому и базовому вариантам, тг;

$С_Б$- себестоимость одного коленчатого вала при восстановлении 1000 коленчатых валов по новому и базовому вариантам, тг.

$$Э_{ГР} = \left[\left(6{,}1 \cdot 1000 - \frac{4700}{1000}\right) - \left(8{,}3 \cdot 1000 - \frac{7380}{1000}\right)\right] \cdot 1000 = 480 тыс.тг.$$

При сравнительной экономической оценке применяемых технологий восстановления коленчатых валов без увеличения объема и повышения качества производимой продукции экономический эффект за счет снижения себестоимости определяется по формуле:

$$Э_{СР} = C_Б - C_Н , \quad (4.34)$$

где $C_Н$ и $C_Б$ - себестоимость восстановления коленчатых валов в новом и старом вариантах на всю партию (1000 шт), тыс.тг.

$$Э_{ср} = 7380 - 4700 = 2680 тыс.тг.$$

Сравнительная экономическая эффективность за счет снижения расхода электроэнергии, затрат труда и других эксплуатационных расходов при одинаковом объеме производства продукции определятся по формуле:

$$Э_О = З_Б - З_Н , \quad (4.35)$$

где $З_Б - З_Н$ - эксплуатационные затраты при использовании новой и базовой технологии восстановления коленчатых валов, тг. Тогда:

$$Э_О = 840 - 270 = 570 тыс.тг.$$

Чистая прибыль представляет часть балансовой прибыли, уменьшенной на сумму налогов:

$$П = Ц - С - Н \quad (4.36)$$

где, Н- общая сумма налогов, тыс,тг.

Тогда: П = 6100 – 4700 – 439 = 961тыс.тг.

Для разработки, отладки и внедрения в производство предлагаемой технологии, а так же для приобретения необходимого оборудования и оснастки требуется 5000тыс.тг. Срок окупаемости вложенных средств составит:

$$O = \frac{K_B}{П_ч} = \frac{5000}{961} = 5{,}2 года \qquad (4.37)$$

Таким образом, при программе 1000 коленчатых валов капитальное вложения окупаются за 5 лет.

В результате промышленного внедрения технологического процесса восстановления чугунного коленчатого вала ЗМЗ-53, расчетный экономический эффект от внедрения данной технологии при программе 1000 коленчатых валов составляет 570 тыс. тенге со сроком окупаемости 5,2 года.

Выводы по главе

На основе теории планирования эксперимента составлена матрица планирования наплавочных экспериментов, содержащая перечень факторов, каждый из которых варьируется на двух уровнях.

В качестве критериев оптимизации процесса наплавки приняты твёрдость наплавленного слоя и напряжения при испытаниях восстановленных валов на усталостную прочность.

По результатам обработки наплавочных экспериментов и на основе методики оптимизации режима наплавочного процесса построены математические модели в виде уравнений регрессий, устанавливающими связи:

а) между твёрдостью наплавляемого на шейки валов слоя и определяющими её факторами;

б) между напряжениями при испытаниях восстановленных валов на усталостную прочность и факторами, влияющими на их значения.

При внедрении в производство разработанной технологии восстановления наплавкой чугунных коленчатых валов проведены маркетинговые исследования. На базе наплавочной установки У-653А создана установка для наплавки чугунных коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53, по разработанной технологии наплавки, которая внедрена на двух предприятиях Алматинской области. Рассчитанный экономический эффект составил 570 тыс.тг. в год на 1000 шт. восстановленных валов со сроком окупаемости капитальных вложений 5,2 года.

Заключение

На основе теоретических и комплексных экспериментальных исследований рабочих процессов электродуговой наплавки чугунных коленчатых валов с введением в дугу специального состава ферромагнитной шихты, выявлены закономерности влияния режимных параметров на физико-

механические и эксплуатационные свойства восстанавливаемых валов, изложены научно-обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в повышение эффективности ремонта автотракторной техники, имеющей важное значение для экономики страны.

Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований диссертационной работы заключается в следующем:

1. Выполнен обзор литературных источников по теории и практики восстановления коленчатых чугунных валов с использованием наплавочных технологических процессов, поставлены задачи исследований;
2. Для восстановления изношенных коленчатых валов и других деталей из высокопрочного чугуна наиболее эффективным является способ наплавки проволокой 15-ГСТЮЦА и подачи в сварочную ванну порошковой композиции состава, масс.%: материал на основе железа 80-84 %, алюминий 6-7 %, графит 10-13 %, которой исключает появление трещин в наплавленном металле и обеспечивает его высокую стойкость в условиях гидроабразивного износа;
3. Разработана усовершенствованная методика оценки износостойкости шеек валов и методика усталостной прочности коленчатых валов, базирующаяся на силовых критериях механики разрушения и статистических данных физико-механических характеристик наплавляемого металла;
4. Результаты лабораторных и экспериментальных испытаний чугунных коленчатых валов, восстановленных по разработанной технологии, показали, что предел выносливости восстановленных наплавкой по технологии ГосНИТИ коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53 равен 3,93 $\frac{кг}{мм^2}$, что составляет 65,5 % от прочности нового, т.е. ниже усталостной долговечности новых коленчатых валов.
5. Усталостная прочность коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53, восстановленных широкослойной наплавкой проволокой 15 ГЮСТЦА с добавкой ферромагнитного порошка по технологии КазНАУ ниже новых деталей на 24,8 % и составляет 75,2 % от уровня новых коленчатых валов ЗМЗ-53. Полученное значение при испытаниях предела усталости равно 4,51 $\frac{кг}{мм^2}$;
6. Износостойкость коренных шеек коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53, восстановленных наплавкой по технологии КазНАУ, находится на уровне износов новых деталей (1,3%), а по шатунным шейкам на 3,75 % превышает её;
7. Методами математического планирования эксперимента, получены регрессионные уравнения зависимостей параметров износа усталостной прочности от влияющих факторов-режимов наплавки, позволяющие получить оптимальные значения;

8. Результаты технологических разработок по восстановлению коленчатых валов из высокопрочного чугуна внедрены на ТОО «Коксукуат», с.Теректы, Енбекши Коксуйского района, Алматинской области; ТОО «БакНурТранс», г.Алматы.

Список использованных источников

1 Назарбаев Н.А. Казахстан-2030. Процветание, безопасность и улучшение жизни всех казахстанцев. Послание Президента страны народу Казахстана. – Алматы: Рауан, 1997. – 61 с.

2 Стратегия индустриально-инновационного развития Республики Казахстан на 2003-2015г Указ президента Республики Казахстан от 17 мая 2003. №1096

3. Назарбаев Н.А. Новый Казахстан в новом мире. Стратегии «Казахстан 20-30 на новом этапе развития Казахстана. Послание президента Республики Казахстан народу Казахстана. Алматы, 2007. – 66 с.

4 Канарчук В.Е. и др. Восстановление автомобильных деталей/ Технология и оборудование.– М.: Транспорт, 1995. – 303 с.

5 Воловик Е.Л. Справочник по восстановлению деталей. – М.: Колос, 1981. – 351 с.

6. Виноградов В.С. Оборудование и технология дуговой автоматической и механизированной сварки. – М.: Высшая школа. Издательский центр «Академия», 1999. – 318 с.

7 Меликов В.В. Сварочные материалы для дуговой сварки/ Справочное пособие. – М.: Машиностроение, 1993.

8 Сергеев В.З., Голубев Н.Г. Многоэлектродная наплавка. – М.: Машиностроение, 1998. – 143 с.

9. Восстановление и упрочнение деталей с применением порошковых материалов. – М.: 1996. – 40 с.

10 Доценко Г.Н. Восстановление чугунных коленчатых валов. –М.: Транспорт, 1970. – 50с.

11 Потапов Ю.С., Коростил А.П. Ремонт деталей автомобилей и сельхозмашин. - Кишинев, – Изд. Картия Молдавеняскэ. 1979. – 98с.

12 Технология и организация ремонта коленчатых валов автотракторных двигателей/ Обзорная информация ЦНИИПИТЭИ. –М.: 1985, -96с.

13 Демьянов Л.А., Сарафанов С.К. Пути повышения надежности и долговечности автотракторных двигателей – М.: Оборонгиз, 1987.

14 Таратута Н.Н., Сверчков А.А. Прогрессивные методы ремонта машин. – Минск.: Ураджай, 1985.

15 Авдеев М.В.Технологические основы повышения долговечности восстанавливаемых деталей сельскохозяйственной техники. Автореферат дис. … докт.техн.наук. – Челябинск, 1975. -54с.

16 Доценко Н.И. Восстановление автомобильных деталей сваркой и наплавкой (НИИАТ) . –М.: Транспорт, 1972. -352с.

17 Ибрагимов Т.Р. Исследование работоспособности чугунных коленчатых валов, отремонтированных и восстановленных наплавкой в кислороде. Автореф. дис. … канд. техн. наук. – Ташкент, 1975. – 17с.

18 Пиманов Г.П. Вибродуговая наплавка под слоем флюса и область ее рационального применения при восстановлении автотракторных деталей. Автореф. дис. … докт. техн. наук. – Л.: Пушкин, 1963. -19с.

19 Таратута А.И., Сверчков А.А. Прогрессивные методы ремонта машин. – Минск.: Урожай, 1975. -344с.

20 Доценко Г.Н. Восстановление чугунных коленчатых валов автоматической наплавкой. – М.: Транспорт, 1970. -55с.

21 Земзин В.Н. Сварные соединения разнородных металлов. – М.: Л.:

Машиностроение, 1966. -285с.

22 Какуевицкий В.А. Износостойкость коленчатых валов, восстановленных различными способами// Сварочное производство, 1968, № 5, С.26-28.

23 Лившиц Л.С., Гринберг Н.А.. Куркумели Э.Г. Основы легирования наплавленного металла. – М.: Машиностроение, 1969. -188с.

24 Ленивкин В.А., и др. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах.- М.: Машиностроение., 1989. -264 с.

25 Потапьевский А.Г. Сварка в защитных газах плавящихся электродом. – М.: Машиностроение, 1974. -240с.

26 Ростошинский М.С. Исследование способа восстановления автомобильных деталей сваркой и наплавкой в углекислом газе.- Автореф. дис. …канд. техн. наук.- М.: 1968. -17 с.

27 Стеренберген Ю.А., Хорунов В.Ф., Грецкий Ю.Я. Сварка и наплавка чугуна. – Киев: Наукова думка, 1971. -265с.

28 Шебанов В.А. Восстановление автотракторных деталей наплавкой в среде углекислого газа. Автореф. дис. … канд. техн. наук.- Киев, 1963. -20с.

29 Шляпин В.Б., Виноградов Ю.Г., Леонтьев Д.В., Лонской Е.Ф. Вибродуговая наплавка под флюсом// – Сварочное производство, 1960, № 2, С.24-26.

30 Эссенсон У.Р. Применение автоматической наплавки для восстановления автотракторных деталей с использованием флюса и углекислого газа. Автореф. дис. … канд. техн. наук. – Ленинград, 1964. -17с.

31 Доценко Г.Н. Износостойкость и усталостная прочность чугунных коленчатых валов ГАЗ-21. – М.: Автомобильная промышленность, 1969, №2.

32 Бевз. И. И., Олховацкий А.К.,, Пелименко А.А., Галямин В.Л.

К вопросу обработки наплавленных чугунных коленчатых валов двигателя автомобиля ГАЗ-53: Труды ЧИМЭСХ, 1977, №133.

33 Россошинский А.А. Металлография сварных швов ГОСНИТИ. -Киев – Изд. Машиностроительной литературы, 1961, -208с.

34 Елистратов П.С. Сварочные свойства чугуна. – М..: Машгиз, 1959. -260с.

35 Куркин С.А., Мовчан В.А., Поздняк Л.А. Стойкость металла против образования горячих трещин при автоматической сварке. – Автоматическая сварка, 1954, №2.

36 Лонский Е.Д. Влияние марганца на механические свойства сварных швов и на склонновть к образованию горячих трещин. – Автогенное дело, 1952, № 10, -С.5-7.

37 Высокопрочный чугун с шаровидным графитом// Под редакцией М.В. Волощенко. -Киев.: Изд. АН УССР, 1974.

38 Горошков А.А., Волощенко М.В. Литые коленчатые валы. – М.: Машиностроение, 1964 -195 с.

39 Буше Н.А. Трение, износ и усталость в машинах. Транспортная техника. М.: 1987. – 223 с.

40 Отчет №2-149. Разработать прогрессивные технологические процессы восстановления деталей сельскохозяйственной техники. Алматы, 2001.-29с.

41 Дехтеринский Л.В., Крюков В.П.,Одоевцева Л.М., Крейнин А.А. Методические указания по выбору рациональных вариантов технологических процессов восстановления деталей. – М.: МАДИ, 1979. – 82с.

42 Гликман Л.А. ,Бабаев А.Н. Усталостная прочность образцов наплавленных автоматической сваркой под флюсом// Металловедение и термическая обработка металлов, 1957. №10, – С.37-43.

43 Алексеев Г.И. Теория сварочных процессов. – М.: Машгиз, 1950.-230с.

44 Патент РК №3646. Способ восстановления изношенных шеек валов. Бисекенов А.Б.,Каржаубаев А.С.,Ермекбаев А.Б., и др. –Бюл. №3. 15.04.1998.

45 Отчет № 06.И1а. Разработать технологический процесс восстановления чугунных коленчатых валов. – Алматы, 2002, - 33с.

46 Отчет №06.И2в. Разработаны ресурсосберегающие технологии и комбинированные агрегаты для возделывания озимой пшеницы, овощей и сахарной свеклы на поливных землях южного региона республики и прогрессивные технологические процессы восстановления деталей сельскохозяйственных машин, провести лабораторные испытания восстановленных деталей. –Алматы, 2003, -58с.

47 Отчет №06.И2в. Разработать ресурсосберегающие технологии и комбинированные агрегаты для возделывания пшеницы, овощей и сахарной свеклы на поливных землях южного региона республики и прогрессивные технологические процессы восстановления деталей сельскохозяйственных машин. Провести эксплуатационные испытания восстановления коленчатых валов. –Алматы, 2004, -29с.

48 Отчёт №КР-01-72, КазНИПИАТ Исследование и разработка способов восстановления изношенных коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53, обеспечивающих прочность и износостойкость. Алма-Ата, 1972., УДК 629. 113. 004. 67. 89 стр.

49 Какуевицкий В.А., Гусейнов Д.Г. Выбор метода наплавки коленчатых валов двигателей ГАЗ-51// Автомобильный транспорт, 1964, №7, С.29-32.

50 Петров Г.Л., Тумарёв А.С. Теория сварочных процессов. М.: Высшая школа. 1997.

51 Теория сварочных процессов// Под редакцией В.В. Фролова. М.: Высшая школа. 1998. – 559 с.

52 Рыкалин Н.Н.. Расчёты тепловых процессов при сварке. Машгиз. М.: 1951. – 296 с.

53 Сидоров А.И.. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой. М.: Машиностроение.1987. - 192 с.

54 Прохоров Н.Н. Горячие трещины при сварке. - М.: Машгиз, 1952. - 219 с.

55 Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. М.: Металлургия, 1975. -456с.

56 Авчинников Б.Е. Усталостная прочность поверхностноупроченных деталей: Труды ВВИА, вып.1183. – М. , 1967. -290с.

57 Волченко В.Н. Оценка и контроль качества сварных соединений с применением статических методов. – М. : Изд-во стандартов, 1974. -160с.

58 Ганченко М.Н., Буфер И.Е. Пористось сварных швов и меры борьбы с ней. – Киев.: Гостехиздат. 1958. - 64с.

59 Сазонов А.А., Подшивалов Ю.Н. Выбор режимов наплавки шеек чугунных коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53 с помощью планирования эксперимента// Труды ЧИМЭСХ, 1977. №13.

60 Крагельский И.В. Трение и износ. Машиностроение. М.: 1968. – 480 с.

61 Борисов М. В. Ускорение испытания машин на испытания машин на износостойкость как основа повышения их качества. М.: Изд-во стандартов, 1976, -352 с.

62 Деев В.А., Линкин Л.Д. Приближенная оценка усталостной прочности упроченных и наплавленных цилиндрических деталей// Вестник машиностроения, 1973, № 3, С.11-12.

63 ГОСТ 2860-65. Металлы. Методы испытания на усталость.

64 Беспалов Ю.А., Сафаров И.И, Тин Тен-Юр. Исследование некоторых динамических параметров машины для испытания натурных деталей на усталость с инерционным возбуждением: Труды Каз Гос СХИ, Том 14, выпуск 1, Алма-Ата, 1971.

65 Отчёт №КР-01-73, КазНИПИАТ. Эксплуатационные испытания коленчатых валов двигателей ЗИЛ-130 и ЗМЗ-53, восстановленных электродуговой наплавкой. Алма-Ата, 1973г., - 80 с.

66 Отчёт №КР-01-74, КазНИПИАТ. Эксплуатационные испытания коленчатых валов двигателей ЗИЛ-130 и ЗМЗ-53, восстановленных электродуговой наплавкой. -Алма-Ата, 1974. - 61с.

67 Бисекен А.Б., Каржаубаев А.С.. Технология восстановления чугунных коленчатых валов на примере коленчатого вала двигателя ЗМЗ-53// Сборник статей научной конференции профессорско-преподавательского состава и аспирантов. КахСХИ ч.2. «Механизация и электрификация сельскохозяйственного производства». Алматы. 1993. – С.36-38.

68 Гоголицын М.А., Едвокимов В.И., Мошенский Ю.А., Павличиков Н.И. Автоматическая наплавка коленчатых валов под флюсом. – Алма-Ата.; КазНИПИАТ, 1963. -87с.

69 Лебедев А.С. Способы восстановления деталей станков. Изд.2е перераб. И доп. – М.:,Л.: Машиностроение, 1964. -256с.

70 Винокуров В.А. Сварочные деформации и напряжения. Методы их устранения. – М. : Машиностроение. 1968. -236с.

71 Елизаветин М.А., Сатель Э.А. Технологические способы повышения долговечности машин. – М.: Машиностроение, 1969. -400с.

72 Луневский И.И., Ермоленко М.И. Сравнение способов восстановления коленчатых валов// Автомобильный транспорт, 1966, № 8, С.28-31.

73 Фрумин И.И. Автоматическая электродуговая наплавка. – М.: Металлургиздат, 1961. -421с.

74 Шадричев В.А., Смирнов М.А., Сидоркин В.И. Исследование внутренних напряжении в образцах из стали 45, наплавленных в углекислом газе проволокой 2Х13. – Сварочное производство, 1973, № 5, -С.32-34.

75 Кравцов Т.Г., Рыжов Н.Ф. Сопротивление усталости моделей валов, наплавленных проволокой Св-06Х19Н9Т в углекислом газе. – Автоматическая сварка, 1980, № 10, -С.36-40.

76 Какуевицкий В.А. Усталостная прочность и деформации чугунных коленчатых валов, восстановленных различными способами наплавки. Сварочное производство. 1981, №7, -С.30-33.

77 Отчёт №КР-02-76, КазНИПИАТ. Внедрение и отработка технологии восстановления шеек коленчатых валов ЗМЗ-53 наплавкой по расплавляемой оболочке под слоем флюса. Алма-Ата, 1976. -48с.

78 Отчёт №КР-01-74**.** Исследование и разработка перспективных технологических процессов, обеспечивающих высокое качество ремонта автомобилей новых моделей.Алма-Ата, 1975, -41с.

79 Мендебаев Т.М., Каржаубаев А.С. Результаты исследования физико-механических свойств покрытия широкослойной наплавкой с добавлением ферромагнитной шихты// Х-международная научная конференция: «Наука и образование – ведущий фактор стратегии «Казахстан – 2030» научный журнал, Караганда.: 2007. –С. 67-69.

80 Мендебаев Т.М., Каржаубаев А.С. Обоснование необходимости проведения эксплуатационных коленчатых валов двигателей ЗМЗ-53// ТОО Издательство «Бастау», журнал «Вестник с/х науки Казахстана». Алматы.: №6, 2007.

81 МендебаевТ.М., КаржаубаевА.С Восстановление чугунного коленчатого вала широкослойной наплавкой // журнал «Вестник с/х науки Казахстана» Алматы: ТОО Издательство «Бастау», №6, 2007, С.60-62.

.

82 Мендебаев Т.М., Каржаубаев А.С. Результаты натурных усталостных испытаний коленчатых валов двигателя ЗМЗ-53// журнал «Вестник с/х науки Казахстана». Алматы.: ТОО Издательство «Бастау», №6, 2007.

83 Бисекен А.Б., Каржаубаев А.С. Сравнительные исследования усталостной прочности чугунных коленчатых валов// «Исследования, результаты». Научный журнал. -Алматы.: №5, 1990. – С.56-69.

84 Бисекен А.Б., Каржаубаев А.С. Сравнительные исследования износостойкости коленчатых валов восстановленных широкослойной наплавкой с ферромагнитной шихтой// Материалы научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава и аспирантов. КазСХИ, Алматы.: 1994. – С.75-76.

85 Бисекен А.Б., Каржаубаев А.С. Исследования усталостной прочности чугунных коленчатых валов восстановленных широкослойной наплавкой с добавкой в дугу ферромагнитной шихты// Материалы Международной научно-практической конференции «Агроинженерная наука – повышению эффективности АПК». Алматы 2003. №3, – С.179-181.

86 Бисекен А.Б., Каржаубаев А.С. Способ восстановления изношенных шеек валов, Алматы.: Патент РК №11717 от 15.04.98 г.

87 Каржаубаев А.С. Выбор рационального метода восстановления коленчатого вала// Международной научно-практическая конференция «Проблемы и перспективы индустриально-инновационного развития». АГТУ, Алматы 2007.

88 Каржаубаев А.С.. Контроль качества восстановленных шеек чугунных коленчатых валов двигателя ЗМЗ-53// Международной научно-практическая конференция «Проблемы и перспективы индустриально-инновационного развития». АГТУ, Алматы.: 2007. – С.19-21.

89 Зигварт Г. Влияние остаточных напряжений на предел выносливости. Сб. Усталость металлов. Изд-во иностр.лит. 1961. – 270с.

90 Иванова В.С., Терентьев В.Ф.. Природа усталости металлов. М.: «Металлургия», 1975 г, -451с.

91 Степанов М.Н. Статистическая обработка результатов механических испытаний, М.: «Машиностроение», 1972, -456с.

92 РТМ 44-62. Методика статистической обработки эмпирических данных. -М.: «Стандартгиз», 1963, -127с.

93 Мазухин Н.Г., Воденисов А.Я. Долговечность стационарного двигателя модели 320Б (ЗМЗ, ГАЗ-21А).Автомобильная промышленность, №7, 1971.

94 Хорунлов Б.П. Влияние состава чугуна на его гравитацию в условиях сварки. – Автоматическая сварка, 1964, № 12, С.46-51.

95 Ларин Г.Н., Баженов В.В. Образование метастабильных структур в чугунных деталях с шаровидной и пластинчатой формой графита при сварке. – Сварочное производство, 1965. № 4, С.1-4.

96 Кудрявцев И.В. и др. Конструкционная прочность чугуна с шаровидным графиком. – М.: Машгиз,1957. -160с

97 Налимов В.В.. Теория эксперимента. М.: Наука.1971. -205с.

98.Румшинский Л.З.. Математическая обработка результатов эксперимента. М.: Наука.1971. – 192 с.

99 Соснин В.А., Уалиев Г.У.. Экспериментальные методы исследования механики машин. Часть 1. Организация и планирование эксперимента. Оценка результатов.. Алматы. КазГУ, 1994. -49 с.

100 Статистические методы в инженерных исследованиях/ Учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 1983. -216с.

101 Лебедь Д.П., Сидорчук В.С. К вопросу о горячих трещинах/ – Автоматическая сварка, 1963. № 2, С.41-42.

102 Лери Г., Гранжон Г. Исследование усталостной прочности деталей, восстановленных наплавкой// В кн. XII конгресс международного института сварки. – М.: Машгиз, 1962, С.146-165.

103 Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

105 Бисекен А.Б., Каржаубаев А.С. Технология восстановления чугунных коленчатых валов на примере коленчатого вала двигателя ЗМЗ-53 // Сборник

статей научной конференции профессорско-преподавательского состава и аспирантов, «Механизация и электрификация сельскохозяйственного производства», Алматы.: КазСХИ, 1993. Часть-2. -С.36-39

106 Методика определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. М.: Экономика. 1977. -54 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Результаты измерений микротвердости по образцу «1»

Таблица 3.1

№	число делений	диагональ, мкм	Н/мм^2, МПа	№	Число делений	диагональ, мкм	Н/мм^2, МПа
1.	58 (0,8)	17,8	5840	28	59 (3,6)	18,11	5850
2	59 (0,9)	18,11	5750	29	60 (3,7)	18,42	5970
3	58 (1,0)	17,8	5740	31	60 (3,8	18,42	5970
4	59 (1,1)	18,11	5650	32	56 (3,9)	17,19	5850
5	59 (1,2)	18,11	5750	33	61 (4,0)	18,73	5900
6	56 (1,3)	17,19	5750	34	60 (4,1)	18,42	5870
7	55 (1,4)	16,88	5760	35	59 (4,2)	18,11	5850
8	57 (1,5)	17,50	5840	36	57 (4,3)	17,50	5940
9	58 (1,6)	17,8	5940	37	60 (4,4)	18,42	5870
10	56 (1,7)	17,19	5850	38	61 (4,5)	18,73	5900
11	58 (1,8)	17,8	5740	39	59 (4,6)	18,11	5950
12	57 (1,9)	17,5	5940	40	57 (4,7)	17,50	5940
13	57 (2,0)	17,5	5940	41	61 (4,8)	18,73	5800
14	60 (2,1)	18,42	5870	42	55 (4,9)	16,88	5960
15	59 (2,3)	18,11	5950	43	54 (5,0)	16,88	5950
16	57 (2,4)	17,5	5940	44	56 (5,1)	17,19	5950
17	56 (2,5)	17,19	5950	45	58 (5,2)	17,8	*5840 гр*
18	58 (2,6)	17,8	5840	46	65 (5,3)	19,95	5590
19	58 (2,7)	17,8	5740	47	64 (5,4)	19,65	5010
20	58 (2,8)	17,8	5740	48	70 (5,5)	21,49	4930
21	58 (2,9)	17,8	5740	49	62 (5,6)	19,03	4540
22	58 (3,0)	17,8	5740	50	79 (5,7)	24,25	4100
23	55 (3,1)	16,88	5960	51	85 (5,8)	26,1	3630
24	57 (3,2)	17,5	5940	52	64 (5,9)	19,65	3510
25	58 (3,3)	17,8	5740	53	66 (6,0)	20,26	3430
26	63 (3,4)	19,34	5880	54	100 (6,5)	10,7	2940
27	59 (3,5)	18,11	5950	55	90 (7,0)	27,63	2580

Результаты измерений микротвердости по образцу «2»

Таблица 3.2

№	Число делений	Диагональ мкм	Н/мм^2, МПа	№	Число делений	Диагональ, мкм	Н/мм^2, МПа
1	73 (0,3)	22,41	5830	33	64 (3,6)	19,65	4610
2	72 (0,5)	23,94	5790	34	65 (3,7)	19,34	4680
3	65 (0,6)	19,95	5690	35	66 (3,8)	20,26	4630
4	66 (0,7)	20,88	5570	36	66 (3,9)	20,26	4630
5	66 (0,8)	20,26	5530	37	63 (4,0)	19,34	4780
6	62 (0,9)	19,03	5440	38	61 (4,1)	18,73	4800
7	62 (1,0)	19,03	5340	39	61 (4,2)	18,73	4900
8	65 (1,1)	19,95	5390	40	**64 (4,3)**	**19,25**	**4810**
9	60 (1,2)	1842	5370	41	65 (4,4)	19,95	4690
10	60 (1,3)	18,42	5370	42	67 (4,5)	20,57	4530
11	65 (1,4)	19,95	5290	43	54 (4,6)	16,58	4450
12	65 (1,5)	19,95	5290	44	64 (4,7)	19,65	4410
13	60 (1,6)	18,42	5270	45	62 (4,8)	19,03	4340
14	65 (1,7)	19,95	5190	46	75 (4,9)	23,02	4240
15	62 (1,8)	19,03	5140	47	59 (5,0)	18,11	4250
16	63 (1,9)	19,34	5080	48	58 (5,1)	20,48	4170
17	64 (2,0)	19,65	5010	49	75 (5,2)	23,02	4040
18	68 (2,1)	19,34	5080	50	74 (6,1)	22,72	3530
19	68 (2,2)	20,88	4970	47	59 (5,0)	18,11	3250
20	66 (2,3)	20,26	4930	48	58 (5,1)	20,48	3170
21	64 (2.4)	19,65	4810	49	75 (5,2)	23,02	3040
22	64 (2,5)	19,65	4910	50	61 (5,3)	20,41	3030
23	66 (2,6)	20,26	4930	51	74 (5,4)	22,01	2901
24	65 (2,7)	19,95	4990	52	66 (5,5)	20,26	2900
25	62 (2,8)	19,63	4840	53	64 (5,5)	23,02	2890
26	62 (2,9)	19,03	4840	54	62 (5,6)	20,57	2880
27	59 (3,0)	18,11	4850	55	68 (5,7)	19,11	2870
28	65 (3,1)	19,95	4790	56	64 (5,8)	20,01	2850
29	62 (3,2)	19,03	4740	57	65 (5,9)	21,09	2840
30	64 (3,3)	19,65	4710	58	63 (6,0)	22,06	2830
31	62 (3,4)	19,03	4740	59	74 (6,1)	22,72	2830
32	65 (3,5)	19,95	4690				

Результаты измерений микротвердости по образцу «3»

Таблица 3.4

№	Число делений	Диагональ, мкм	Н/мм^2, МПа	№	Число делений	Диагональ, мкм	Н/мм^2, МПа
1	86 (0,5)	26,40	4610	30	77 (3,4)	23,64	3640
2	78 (0,6)	23,94	4590	31	75 (3,5)	23,02	3540
3	84 (0,7)	25,79	4540	32	76 (3,6)	23,33	3350
4	80 (0,8)	24,56	4500	33	76 (3,7)	23,33	3350
5	82 (0,9)	25,17	4460	34	75 (3,8)	23,02	3440
6	81 (1,0)	24,87	4440	35	75 (3,9)	23,02	3440
7	82 (1,1)	25,17	4360	36	71 (4,0)	21,80	3430
8	82 (1,2)	25,17	4360	37	77 (4,1)	23,64	3470
9	81 (1,3)	24,87	4340	38	75 (4,2)	23,02	3440
10	80 (1,4)	24,56	4200	**39**	**75 (4,3)**	**23,02**	**3440**
11	77 (1,5)	23,64	4270	40	73 (4,4)	22,41	3430
12	80 (1,6)	24,56	4200	41	71 (4,5)	21,8	3430
13	76 (1,7)	23,94	4190	42	72 (4,6)	22,1	3330
14	80 (1,8)	24,56	4150	43	74 (4,7)	22,72	3230
15	76 (1,9)	23,33	4150	44	69 (4,8)	21,18	3220
16	76 (2,0)	23,33	4050	45	69 (4,9)	21,18	3120
17	74 (2,1)	22,72	4030	46	68 (5,0)	20,88	3170
18	77 (2,2)	23,64	4070	47	69 (5,1)	21,18	3020
19	76 (2,3)	23,33	4000	48	68 (5,2)	20,88	3070
20	77 (2,4)	23,64	3970	49	74 (5,3)	22,72	2950
21	78 (2,5)	23,94	3890	50	72 (5,4)	22,1	2930
22	76 (2,6)	23,33	3850	51	71 (5,5)	21,8	2930
23	74 (2,7)	22,72	3830	52	70 (5,6)	21,49	2830
24	74 (2,8)	22,72	3730	53	70 (5,7)	21,49	2730
25	76 (2,9)	23,33	3650	54	74 (5,8)	22,72	2730
26	72 (3,0)	22,1	3630	55	73 (5,9)	22,41	2730
27	76 (3,1)	23,33	3650	56	75 (6,0)	23,02	2640
28	75 (3,2)	23,02	3640	57	83 (6,5)	25,48	2590
29	75 (3,3)	23,02	3640	58	77 (6,6)	23,64	2470

Результаты измерений микротвердости по образцу «5»

Таблица 3.5

№	Число делений	Диагональ, мкм	Н/мм^2, МПа	№	Число делений	Диагональ, мкм	Н/мм^2, МПа
1	63 (0,3)	19,34	4880	28	65 (3,0)	19,95	3590
2	66 (0,4)	20,26	4730	29	72 (3,1)	22,10	3530
3	67 (0,5)	20,57	4630	30	69 (3,2)	21,18	3520
4	66 (0,6)	20,26	4630	31	71 (3,3)	21,80	3630
5	67 (0,7)	20,57	4530	32	68 (3,4)	20,88	3670
6	68 (0,8)	20,88	4570	33	74 (3,5)	22,72	3630
7	68 (0,9)	20,88	4420	34	67 (3,6)	20,57	3730
8	68 (1,0)	20,88	4320	35	71 (3,7)	21,8	3730
9	67 (1,1)	20,57	4230	36	72 (3,8)	22,1	3830
10	63 (1,2)	19,34	4280	37	70 (3,9)	21,49	3830
11	68 (1,3)	20,88	4170	38	72 (4,0)	22,1	3730
12	73 (1,4)	22,41	4030	39	74 (4,1)	22,72	3630
13	74 (1,5)	22,72	3930	40	70 (4,2)	21,49	3730
14	67 (1,6)	20,57	3930	41	73 (4,3)	22,41	3730
15	65 (1,7)	19,95	3890	42	62 (4,4)	19,03	3840
16	66 (1,8)	20,36	3830	43	62 (6,5)	19,03	3840
17	66 (1,9)	20,26	3830	44	65 (4,6)	19,95	3890
18	69 (2,0)	21,18	3720	45	72 (4,7)	22,10	3730
19	69 (2,1)	21,18	3820	46	65 (4,8)	19,95	3990
20	66 (2,2)	20,26	3730	47	65 (4,6)	19,95	3990
21	73 (2,3)	22,41	3630	48	64 (5,0)	19,65	3910
22	68 (2,4)	20,88	3570	49	64 (5,1)	19,65	4010
23	70 (2,5)	21,40	3430	50	59 (5,2)	18,11	3650
24	76 (2,6)	23,33	3450	51	61 (5,3)	18,73	3400
25	73 (2,4)	22,41	3530	52	76 (5,4)	23,33	3350
26	72 (2,8)	22,10	3530	53	75 (6,0)	23,02	3040
27	70 (2,9)	21,49	3630				

Результаты измерений микротвердости по образцу «6»

Таблица 3.6

№	Число делений	Диагональ, мкм	Н/мм^2, МПа	№	Число делений	Диагональ, мкм	Н/мм^2, мм
1	60 (0,6)	18,42	5870	30	63 (3,5)	19,34	4880
2	54 (0,7)	16,58	5850	31	56 (3,6)	17,19	4860
3	57 (0,8)	17,5	5840	32	62 (3,7)	19,03	4740
4	55 (0,9)	16,88	5760	33	55 (3,8)	16,88	4660
5	57 (1,0)	17,15	5740	34	57 (3,9)	17,5	4540
6	59 (1,1)	18,11	5750	35	63 (4,0)	19,34	4580
7	57 (1,2)	17,5	5640	36	55 (4,1)	16,88	4360
8	58 (1,3)	17,8	5640	37	56 (4,2)	17,19	4350
9	57 (1,4)	17,5	5640	**38**	**55 (4,3)**	**16,88**	**4260**
10	56 (1,5)	17,19	5550	39	60 (4,4)	18,42	4170
11	55 (1,6)	16,88	5560	40	50 (4,5)	18,11	4150
12	57 (1,7)	17,5	5440	41	55 (4,6)	16,88	4060
13	54 (1,8)	16,58	5450	42	55 (4,7)	16,88	4260
14	55 (1,9)	16,88	5560	43	60 (4,8)	18,42	4170
15	58 (2,0)	17,8	5540	44	50 (4,9)	18,11	4150
16	56 (2,1)	17,19	5450	45	55 (5,0)	16,88	4060
17	56 (2,2)	17,19	5550	46	50 (5,1)	18,11	4150
18	58 (2,3)	17,8	5540	47	55 (5,2)	18,41	3940
19	59 (2,4)	18,11	5550	48	60 (5,3)	16,50	3900
20	61 (2,5)	18,73	5500	49	61 (5,4)	17,05	3850
21	54 (2,6)	16,58	5450	50	56 (5,5)	16,58	3800
22	57 (2,7)	17,5	5640	51	55 (5,6)	19,50	3780
23	57 (2,8)	17,5	5640	52	57 (5,7)	21,08	3750
24	58 (2,9)	17,8	5740	53	60 (5,8)	24,50	3690
25	71 (3,0)	21,8	5730 гр	54	67 (5,9)	22,01	3650
26	67 (3,1)	20,57	5430	55	58 (6,0)	20,30	3585
27	64 (3,2)	19,65	5210	56	55 (5,5)	16,88	3410
28	55 (3,3)	16,88	5160				
29	62 (3,4)	19,03	5040				

Результаты измерений микротвердости по образцу «4»

Таблица 3.7

№	Число делений	Диагональ, мкм	Н/мм^2, МПа	№	Число делений	Диагональ, мкм	Н/мм^2, МПа
1	65 (0,7)	19,95	6090	29	65 (3,5)	19,95	5190
2	61 (0,8)	18,73	6060	30	62 (3,6)	19,03	5140
3	62 (0,9)	19,03	6040	31	65 (3,7)	19,95	5090
4	64 (1,0)	19,65	6010	32	62 (3,8)	19,03	5040
5	62 (1,1)	19,03	5940	33	60 (3,9)	18,42	4970
6	67 (1,2)	20,57	5930	34	59 (4,0)	18,11	5050
7	64 (1,3)	19,65	5910	35	61 (4,1)	18,73	5000
8	70 (1,4)	21,49	5930	36	61 (4,2)	18,73	5100
9	69 (1,5)	21,18	5820	37	60 (4,3)	18,42	5170
10	59 (1,6)	18,11	5850	38	62 (4,4)	19,03	5040
11	69 (1,7)	21,18	5720	39	60 (4,5)	18,42	5170
12	61 (1,8)	18,73	5700	40	63 (4,6)	19,34	5180
13	62 (1,9)	19,03	5740	41	61 (4,7)	18,73	5200
14	64 (2,0)	19,65	5610	42	59 (4,8)	18,11	**5250гр**
15	64 (2,1)	19,65	5610	43	67 (4,9)	20,57	4930
16	61 (2,2)	18,73	5600	44	59 (5,0)	18,11	4850
17	67 (2,3)	20,57	5630	45	56 (5,1)	17,19	4750
18	67 (2,4)	20,57	5630	46	58 (5,2)	17,8	4640
19	62 (2,5)	19,03	5540	47	60 (5,3)	18,42	4570
20	61 (2,6)	18,73	5500	48	62 (5,4)	19,03	4540
21	64 (2,7)	19,65	5510	49	58 (5,5)	17,8	4440
22	65 (2,8)	19,95	5490	50	59 (5,6)	18,11	4250
23	65 (2,9)	19,95	5490	51	64 (5,7)	19,65	4110
24	64 (3,0)	19,65	5410	52	62 (5,8)	19,03	4040
25	64 (3,1)	19,65	5310	53	60 (5,9)	18,42	3870
26	60 (3,2)	18,42	5370	54	67 (6,0)	20,57	4230
27	65 (3,3)	19,95	5390	55	68 (6,1)	20,88	4170
28	64 (3,4)	19,65	5210	56	93 (6,2)	28,55	2240