

Сулеев Д.К., Утепов Е.Б., Утепов Т.Е.,
Сыдыкова А.Б., Утепова Г.Е.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ
МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ШУМА
СОУДАРЕНИЙ В УЗЛАХ МАШИН
И МЕХАНИЗМОВ**

Под научной редакцией академика Международной
(С. Петербургской) академии наук экологии и безопасности
жизнедеятельности (МАНЭБ), доктора технических наук, про-
фессора Утепова Е.Б.

Алматы 2008

УДК 628.517

ББК 31.2

А 44

Рецензент: кандидат технических наук А.А. Парфенов
(г. Москва)

Сулеев Д.К., Утепов Е.Б., Утепов Т.Е.,
Сыдыкова А.Б., Утепова Г.Е.

Под научной редакцией академика МАНЭБ, доктора технических наук, профессора Утепова Е.Б.

А 44 Использование биметаллических материалов для снижения шума соударений в узлах машин и механизмов. – Алматы: «КазНТУ имени К.И. Сатпаева», 2008. – 103 с.

ISBN 9965-01-575-9

В монографии даны сведения о биметаллах, охарактеризованы коррозионностойкие биметаллы, проводниковые и контактные биметаллы, термобиметаллы; преимущества биметаллов по сравнению с однородными металлами; представлены теоретические и экспериментальные исследования процесса получения биметаллов. Подробный анализ дан демпфирующим сплавам используемым в борьбе с шумом, приведены методы и устройства для исследования акустических и вибрационных характеристик.

Монография такого научного направления крайне редкая, в чем ее и ценность, она представляет интерес не только для материаловедов, инженеров, специалистов по акустической диагностике машин, но и для специалистов в области охраны труда и технике безопасности, для магистрантов, студентов вузов.

ВВЕДЕНИЕ

В современном материаловедении важное значение приобретает получение новых материалов со специальными свойствами. К числу таких материалов с полным правом можно отнести биметаллы – слойные материалы, состоящие из двух или более металлов или сплавов.

Биметаллический прокат позволяет получать такое сочетание служебных свойств, которое нельзя получить в одном отдельно взятом металле или сплаве, например высокую прочность с коррозионной стойкостью, ударную вязкость с износостойкостью, прочность с высокой электро - и теплопроводностью и т. д.

Применение биметаллических листов, проволоки, многослойной ленты, двухслойной инструментальной стали дает значительную экономию в народном хозяйстве меди, никеля, вольфрама и других дефицитных металлов.

Биметаллом называют двухслойный или многослойный материал, состоящий из двух различных металлов или сплавов, прочно соединенных между собой по всей плоскости соприкосновения, и представляющий собой монолитное целое.

Значительно реже применяется многослойный материал, состоящий из трех или более различных металлов или сплавов. Такой материал принципиально не отличается от двухслойного биметалла и поэтому с целью упрощения терминологии его также можно с некоторой условностью называть биметаллом, поскольку в нем имеется не менее двух различных материалов.

В настоящее время в СНГ и в других странах биметалл как прогрессивный вид материала нашел применение в самых различных отраслях промышленности: в химической и нефтеперерабатывающей аппаратуре, в машиностроении и приборостроении, в судостроении и автотракторостроении, в сельском хозяйстве и электропромышленности, в инструментальной промышленности и радиоэлектронике и т. д.

Применение в различных отраслях промышленности биметаллов непрерывно расширяется. В больших количествах биметалл выпускается в США, Франции, Германии, Англии и СНГ. Внедрение биметаллов в химическом машиностроении является одним из основных путей экономии дефицитных металлов и сплавов.

Параллельно с освоением производства различных биметаллов ведется разработка технологии изготовления из нее химической аппаратуры. В этой работе принимают участие, как специализированные научно-исследовательские институты, так и машиностроительные заводы. Важнейшим элементом этой технологии является технология сварки биметаллов, которая в значительной степени определяет возможность применения того или иного биметалла. Успешная разработка технологии сварки обеспечивает высокие механические свойства и высокую коррозионную стойкость сварных соединений, в связи, с чем биметалл можно использовать почти во всех случаях, где для химической аппаратуры используется коррозионностойкая сталь.

В соответствии с разнообразным применением в настоящее время биметалл производится в различных видах, а именно в виде листа, ленты, полосы, прутков, проволоки, тросов, фасонных профилей и труб. Из этого перечня видно, что биметалл выпускается почти во всех видах, в которых выпускаются стали и сплавы широкого применения.

По применению все известные в настоящее время биметаллы могут быть условно разделены на коррозионностойкие биметаллы, антифрикционные биметаллы, износостойкие, инструментальные и самозатачивающиеся биметаллы, проводниковые, контактные и термобиметаллы.

Как видно, из классификации Голованенко С.А. и Меандрова Л.В., отсутствуют биметаллы, которые могли бы обеспечить снижение шума и вибрации, т.е. демпфирующие биметаллы, перспектива развития которых огромна. Возможность использования биметаллов для ограничения звуковой вибрации весьма перспективна, т.к. скорость звука и вибрации в твердом теле существенно зависит от физико-механических характери-

стик составляющих конструкцию. В биметалле можно использовать металлы, где скорость звука различна, что гарантирует замедление скорости звука. Кроме того, имеется граница раздела, где звук имеет другое значение скорости, в итоге теоретически уже можно определить, как будут изменяться уровни шума и вибрации в биметалле. В настоящей монографии представлены материалы, характеризующие свойства биметаллов, используемых в технике борьбы с шумом и вибрацией.

1 СВОЙСТВА БИМЕТАЛЛОВ

1. Коррозионностойкие биметаллы

К этой категории относятся листовые биметаллы, биметаллические трубы, биметаллические профили и прутки. Подавляющее большинство выпускаемого коррозионностойкого биметалла приходится на биметаллы, которые в качестве основы имеют углеродистую или низколегированную сталь, а в качестве плакирующего слоя – коррозионностойкие стали различных композиций, медные и никелевые сплавы, медь, никель, титан, серебро, алюминий и некоторые другие металлы и сплавы.

Выбор той или иной композиции биметалла, естественно, зависит от условий службы данного биметалла, т. е. плакирующий слой биметалла должен быть стойким против агрессивного воздействия данной среды, а основной слой должен обеспечивать необходимую конструкционную прочность и жесткость изделия. При этом стоимость биметалла, как правило, должна быть ниже стоимости однородного коррозионностойкого материала. Последнее требование иногда может не соблюдаться в том случае, если биметалл имеет принципиально новые служебные свойства, которые не могут быть получены у однородного материала.

Например, медь, никель и серебро являются материалами, стойкими в определенных химических средах. При необходимости изготовления из этих металлов деталей химической аппаратуры, работающей при повышенном давлении и температуре, конструкционная прочность их является недостаточной. Лишь в случае использования биметалла с основой из стали и плакировкой из меди, никеля или серебра удастся достичь требуемой прочности аппарата и коррозионной стойкости. Таким образом, лишь при применении биметалла достигаются необходимые конструкционные свойства материала.

В качестве основного слоя биметалла наибольшее распространение во всех отраслях промышленности получила обычная углеродистая мартеновская спокойная сталь с содержанием углерода не более 0,25%.

В качестве плакирующего слоя в отечественной и зарубежной практике нашли распространение те же коррозионностойкие стали и металлы, которые применяются и в виде однородного металла для аналогичных сред. К их числу относятся: хромоникелевые стали с добавками титана или ниобия, хромистые стали, хромоникельмолибденовые стали с титаном или медью и титаном (ГОСТ 5632 – 61); медные сплавы (латунь, бронза и томпак); никелевые сплавы (монель, инконель, хастеллой); чистые металлы (медь, никель, титан, алюминий, серебро и др.).

В США для основного слоя применяются углеродистые и низколегированные стали, легированные молибденом или хромом и молибденом. В качестве плакирующего слоя в США используются коррозионностойкие хромистые, хромоникелевые и хромоникельмолибденовые стали.

Основной характеристикой коррозионностойкого биметалла является его устойчивость в различных агрессивных средах. Поэтому материал плакирующего слоя выбирают с учетом этого обстоятельства.

Для современного химического машиностроения основными агрессивными средами являются соляная, азотная, серная и фосфорная кислоты, применяемые в разных концентрациях (от разбавленных до крепких) при разных температурах (от комнатной до кипения) и давлениях. Могут применяться и смеси этих кислот.

Перечисленные среды являются основными при производстве минеральных удобрений и различных синтетических материалов. В химических аппаратах перерабатываются или возникают как полупродукт и другие среды. Однако по степени агрессивности они уступают перечисленным, и поэтому при общей оценке коррозионной стойкости плакирующих слоев биметаллов можно ограничиться их оценкой в четырех кислотах разных концентраций и при разных температурах. Более подробные сведения по этому вопросу можно получить в специальной литературе [2,3].

Коррозионностойкие биметаллы нашли широкое применение в различных крупногабаритных конструкциях, в том числе

используемых в подвижном составе и на судах, вследствие чего вопроса о весе конструкции является немаловажным.

Листовой биметалл должен обладать высокой прочностью соединения слоев, так как в противном случае при изготовлении из биметалла изделий или в процессе службы изделий может произойти расслоение биметалла.

Коррозионностойкие биметаллы находят весьма широкое применение в виде тонких и толстых листов, а также в виде труб в химической, нефтеперерабатывающей, целлюлозно-бумажной, пищевой промышленности и судостроении.

Коррозионностойкие биметаллы имеют наибольший удельный вес в общем, выпуске различного вида биметаллов, как в нашей стране, так и за рубежом. Такое положение, вероятно, сохранится и в дальнейшем в связи с интенсивным развитием химической и нефтеперерабатывающей промышленности.

Наиболее широко используют биметалл в виде листов. При этом в настоящее время в соответствии с разнообразными требованиями нашли применение следующие композиции сталей, металлов и сплавов:

- углеродистая сталь + коррозионностойкая сталь;
- низколегированная сталь + коррозионностойкая сталь;
- углеродистая сталь + медь;
- углеродистая сталь + медные сплавы (томпак, монель, инконель, латунь, бронза);
- углеродистая сталь + никель;
- углеродистая сталь + титан;
- углеродистая сталь + серебро;
- углеродистая сталь + алюминий;
- углеродистая сталь + хастеллой.

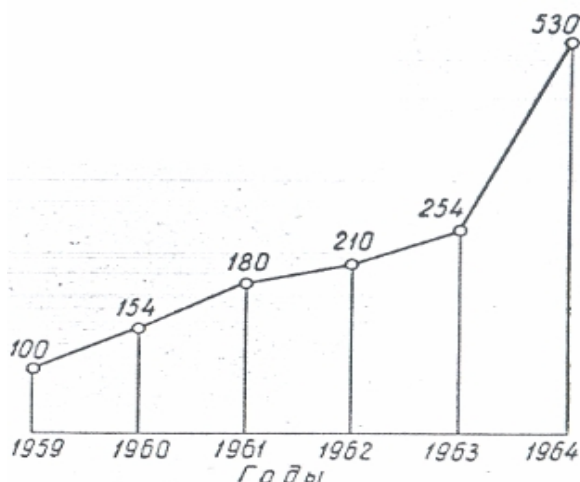


Рис. 1. Производство толстых нержавеющих биметаллических листов в СССР (в % к 1959 г.)

Наибольшая доля в выпуске коррозионностойкого биметалла приходится на композиции углеродистых и различных коррозионностойких сталей.

Это объясняется тем, что выпускаемые в настоящее время различные коррозионностойкие стали, удовлетворяют большинству требований в отношении коррозионной стойкости и прочности.

Биметаллы (углеродистая сталь с коррозионностойкой сталью) применяются в химическом машиностроении для изготовления реакционных колонн, автоклавов, реакторов, теплообменников, аппаратуры для обезжиривания, кристаллизаторов, аппаратуры для восстановительных реакций, смесителей, аппаратуры сернокислотных заводов, складских резервуаров, вакуум-аппаратов, башен для восстановительных реакций с увлажнением конденсаторов.

Листовой биметалл, состоящий из углеродистой стали, плакированный медными сплавами (томпак, монель, инконель, латунь, бронза), находит широкое применение в различных от-

раслях промышленности главным образом как коррозионно-стойкий биметалл для различных элементов химической аппаратуры, где другие покрытия не являются коррозионностойкими. Так, например, листовой биметалл с плакирующим слоем из сплава монель может найти применение в химическом машиностроении и судостроении.

Применение этого биметалла в химическом машиностроении целесообразно, так как сплав монель, кроме хороших коррозионных свойств, сохраняет свои механические свойства до температур 400 – 450° С.

Единственным материалом, сочетающим высокую коррозионную стойкость с достаточной прочностью и относительно невысокой стоимостью, является плакированная сталь, представляющая собой конструкционную сталь, покрытую с одной или двух сторон коррозионностойкой сталью или каким-либо другим, коррозионностойким металлом (медь, никель, титан, алюминий или их сплавы): Необходимая коррозионная стойкость достигается подбором соответствующего плакирующего слоя, а прочность – подбором марки стали для основного слоя.

Кроме двухслойных листов с плакирующим слоем из коррозионностойких сталей и специальных сплавов в качестве коррозионностойких материалов, в СНГ подготавливается производство биметаллов с плакирующим слоем из цветных металлов — титана, никеля, меди, серебра и некоторых других. Листы со слоем из никеля могут выпускаться тех же размеров, что и со слоем коррозионностойких сталей широкого применения, так как никель несущественно отличается по своим технологическим свойствам от сталей.

Иначе обстоит дело при изготовлении биметалла с плакирующим слоем из титана, меди и серебра, которые по свойствам сильно отличаются от стали. Особенно резкое отличие в температурах горячей обработки давлением.

1. 2 Антифрикционные биметаллы

Широкое применение поршневых двигателей внутреннего сгорания поставило задачу создания недорогих и недефицитных материалов для подшипников взамен дефицитной свинцовой

бронзы. Впервые алюминиевые сплавы для подшипников двигателей внутреннего сгорания были предложены еще во время первой мировой войны, что было обусловлено острой необходимостью замены дефицитных цветных металлов, таких как олово и медь, а также повышением рабочих нагрузок и скоростей. Однако эти материалы были применены в виде литых вкладышей, что снижало их прочность.

Многочисленные исследовательские работы в направлении изыскания недорогих материалов для подшипников показали, что имеется принципиальное противоречие, так как необходимо обеспечить хорошие антифрикционные свойства сплава и достаточную его конструкционную прочность. В СНГ и за рубежом исследовательскими организациями было уделено много внимания разработке новых подшипниковых сплавов, отвечающих всем условиям работы поршневых двигателей.

И лишь после второй мировой войны алюминиевые сплавы нашли широкое применение в качестве антифрикционного плакирующего материала при изготовлении вкладышей подшипников из биметалла на стальной основе.

Эту задачу удалось разрешить лишь при использовании биметаллического вкладыша подшипника, верхний слой которого состоит из мягкого антифрикционного сплава на алюминиевой основе, а нижний слой представляет собой малоуглеродистую сталь, придающую вкладышу достаточную механическую прочность.

В настоящее время биметаллические стальные ленты, покрытые антифрикционными сплавами на основе алюминия, находят широкое применение для изготовления вкладышей подшипников коленчатых валов в тракторных и комбайновых двигателях.

1. 3 Инструментальные и самозатачивающие биметаллы

Биметаллические двухслойные и трехслойные листы и полосы нашли широкое применение для режущего инструмента— для машинных ножей, кожевенных и бумагорежущих машин и других инструментов. Такие ножи сочетают в себе высокие режущие свойства за счет высоколегированной закаливаемой ин-

струментальной стали и высокую вязкость за счет основы из углеродистой стали, что особенно важно для машинных ножей, испытывающих в процессе работы динамические нагрузки.

В результате широкого использования биметалла для режущего инструмента достигается значительная экономия высоколегированных сталей, имеющих дефицитные легирующие элементы, такие как хром, вольфрам, ванадий и др.

В биметаллическом инструменте основа его изготавливается из низкоуглеродистой стали, а режущая часть из легированной стали или твердых сплавов.

Известны и другие типы биметаллов для ножей, применяемых в промышленности. Так, одна из английских фирм – Ротергам Форж – производит разнообразные виды биметалла для режущего инструмента (рисунок 2).

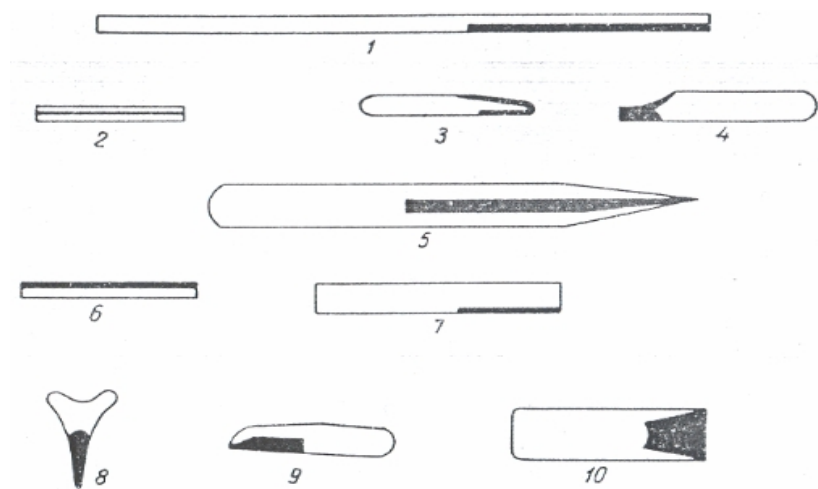


Рис. 2. Виды биметаллических профилей для режущего инструмента и других целей [1]:

- 1 – железка для рубанка скошенная; 2 – нож для кожи; 3 и 4 – ножи для травокосилки; 5 – обдирный нож; 6 – зубчатая полоса в жнейке; 7 – нож для резки бумаги и шпона; 8 – спираль для резки тканей; 9 – нож для травокосилки; 10 – коса

На рисунке 3 показаны возможные конструкции биметаллического инструмента.

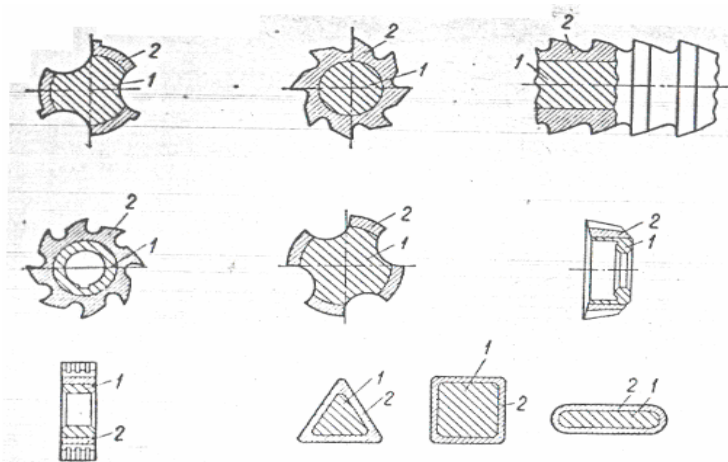


Рис. 3. Конструкции различных режущих инструментов
из биметаллических профилей [1];
1 – конструкционная сталь; 2 – инструментальная сталь

1. 4 Проводниковые и контактные биметаллы

В электропромышленности и электронике широкое применение имеют биметаллы в виде проволоки, полос, лент и труб. Они применяются в качестве проводниковых биметаллов. В этих биметаллах используются разнообразные сочетания металлов и сплавов, причем чаще всего более электропроводный металл располагается на поверхности, а основой является менее электропроводный металл или сталь.

Это обусловлено возможностью получения хороших служебных свойств при минимальном расходе дорогих проводниковых материалов и также получением новых служебных свойств материала.

1. 5 Термобиметаллы

Термобиметалл обычно в виде полос, листов или лент состоит из двух слоев металла или сплавов, отличающихся коэффициентами линейного расширения. Полоса термобиметалла изгибается при нагревании из-за большего расширения одного слоя, тормозящегося меньшим расширением другого слоя. Таким образом, первым, но не единственным условием сочетания какой-либо пары материалов в термобиметалле является возможно большее различие коэффициентов линейного расширения составляющих. Вторым условием пригодности пары материалов для термобиметалла является наименьшее отличие температур плавления, температур горячей обработки давлением и модулей упругости. Третьим условием является возможность обеспечения прочного соединения по всей плоскости обоих компонентов. Для этого допускается, в крайнем случае, введение промежуточного слоя. Необходимо также упомянуть, что во многих случаях имеет еще значение электро – и теплопроводность и коррозионная устойчивость компонентов.

Термобиметаллы находят широкое применение в различных I аппаратах и приборах, таких как термометры, терморегуляторы, реле времени, защитные реле и др. Область применения термобиметаллов все время расширяется, в результате чего увеличивается спрос на марки, обладающие новым сочетанием свойств [15].

1. 6 Сравнение биметаллов по сравнению с однородными металлами

Создание биметаллов для промышленного их использования диктуется целым рядом преимуществ, которые имеют биметаллы в сравнении с однородными металлами.

Кроме достижения новых свойств материала, биметалл позволяет достичь значительной экономии дорогих сталей, сплавов и металлов. Это достигается благодаря использованию в биметалле дорогих материалов в виде относительно тонких плакирующих слоев в сочетании с более дешевой основой, напри-

мер углеродистой или низколегированной сталью. Обычно в биметаллах толщина слоя составляет от 5 до 20% от общей толщины листа и лишь в редких случаях достигает 40–50 %.

Так, например, для 1 т толстого стального листа из нержавеющей стали расходуется в среднем около 1,4–1,6 т коррозионной стали в слитках.

При изготовлении же 1 т биметаллического коррозионно-стойкого листа тех же размеров расходуется не более 0,5 т нержавеющей стали в слитках.

Следовательно, экономия коррозионностойкой стали в слитках в этом случае достигает 0,9–1,0 т на 1 т готового листа, или около 70%. Иными словами, это равноценно увеличению ресурса по выпуску коррозионностойкого листа.

Таким образом, замена однородных листов биметаллическими дает возможность увеличить производство коррозионно-стойких листов, в которых остро нуждается химическое машиностроение, без дополнительного расхода дефицитных легирующих металлов.

2. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ИЗГОТОВЛЕНИЯ БИМЕТАЛЛОВ

2. 1 Теория сцепления металлов

В основе почти всех процессов получения биметаллов лежит явление схватывания металлов. Под схватыванием понимается соединение поверхностей двух одноименных, или разноименных металлов с образованием металлических связей.

Схватывание наблюдается в различных областях техники, причем в одних случаях оно способствует технологическому процессу, например при всех видах сварки металлов, при получении металлических покрытий, в порошковой металлургии; в других случаях — при трении деталей машин, обработке резанием, при некоторых процессах обработки металлов давлением — схватывание вредно, оно ведет к повышенному износу инструмента машин, снижает качество продукции.

Из сказанного ясно, какое большое значение имеют теоретические и экспериментальные исследования схватывания, четкое представление о механизме этого явления и изучение широкого круга факторов, влияющих на схватывание в том или ином направлении.

Взаимодействие двух сближаемых металлических поверхностей заключается в возникновении между ними сил взаимного притяжения и отталкивания, различных по своей природе и величине. Молекулярные силы притяжения и силы межуатомного сцепления (силы Ван-дер-Ваальса) действуют между поверхностями чистых металлов до появления металлических связей. Эти силы имеют электрическую природу и объясняются поляризацией нейтральных частиц.

Силы межуатомного сцепления убывают пропорционально седьмой степени расстояния [6].

При сближении поверхностей на расстояние порядка $10-10^3$ Å возникают металлические связи вследствие образования общего электронного облака, взаимодействующего в равной степени с ионизированными атомами обеих поверхностей. Граница раздела исчезает и прочность получившегося соединения

равна прочности самого металла. Дальнейшему сближению препятствуют, силы взаимодействия в атомной решетке металла.

Изложенные положения относятся к взаимодействию идеально чистых и гладких металлических поверхностей. В практических условиях поверхность любого металла неровная.

Таким образом, при сближении в практических условиях металлических поверхностей, например при наложении, двух кусков у металла друг на друга, площадь действительного контакта будет чрезвычайно малой. Для ее увеличения необходима деформация поверхностных неровностей, осуществление которой в свою очередь требует приложения значительных нагрузок. Поскольку при деформации неровностей, имеет место сложное напряженное состояние, напряжения на поверхности контакта должны в несколько раз превышать предел текучести металла.

Все металлы имеют на своей поверхности различного рода загрязнения и жировые пленки, которые можно устранить. Значительно сложнее предохранить металлическую поверхность от окисления, так как удаленная любым путем окисная пленка немедленно восстанавливается. Препятствуя непосредственному контакту металлических поверхностей, пленки окислов исключают образование металлической связи, поэтому там, где наблюдается схватывание, естественно полагать нарушение окисных пленок и обнажение чистых участков поверхности металла.

Существующие гипотезы схватывания создавались главным образом в результате исследований процесса холодной сварки металлов и процесса трения в деталях машин.

Явление схватывания металлов имеет место не только в указанных, но и в других процессах, причем механизм этого явления, очевидно, зависит в определенной степени от условий процесса, его специфики. Однако нет оснований полагать, что механизм схватывания в различных процессах отличается коренным образом и требует для своего объяснения нескольких теорий, появление которых вызвано главным образом различными взглядами авторов.

Авторы «пленочной» гипотезы [7, 8] исходят из того, что для возникновения металлических связей необходимо и доста-

точно сближения чистых металлических поверхностей на расстояние порядка параметра кристаллической решетки.

«Пленочная» гипотеза не отрицает зависимости схватывания от свойств металлов, как это иногда утверждают, исходя из основного положения этой гипотезы об определяющем влиянии на схватывание свойств поверхностных пленок.

Деформация контактирующих поверхностей ведет к увеличению их площади и выходу на поверхность новых участков металла. Большое значение при этом имеют свойства и поведение пленок и загрязнений.

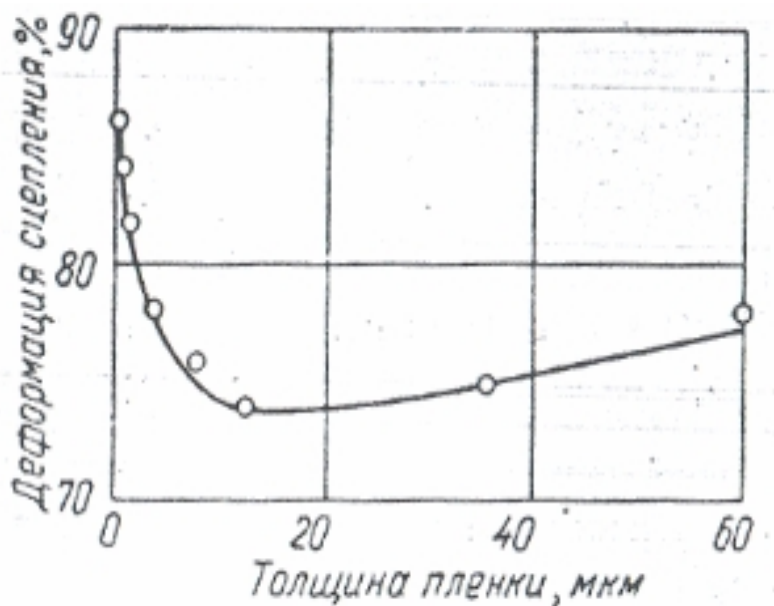


Рис. 4. Зависимость деформации сцепления с пленкой никеля от толщины пленки [8]



Рис. 5. Зависимость деформации сцепления различных металлов с прокладками из фольги от относительной твердости фольги [22]

Чем пленки мягче, тем больше они растекаются, покрывая чистые обнажившиеся участки поверхности металла. «Твердые» относительно металла пленки разрываются и дробятся и не покрывают всей поверхности контакта, тем самым, создавая возможность для схватывания на ювенальных участках. Существенное значение имеет и толщина пленки, влияющая на ее пластичность. Опыты С. Б. Айнбиндера и Э. Ф. Клоковой [9] показывают, что в общем случае с увеличением толщины пленки или отношения твердости пленки к твердости основного металла деформация, обеспечивающая сцепление, уменьшается. Авторы «пленочной» гипотезы предложили для увеличения схватывания в процессе холодной сварки производить предварительное покрытие металла твердыми пленками. Это предложение представляет значительный интерес, однако пока его реализация не дала однозначных результатов [11].

Следует заметить, что авторы «пленочной» гипотезы, подчеркивая в большинстве работ определяющее влияние на схватывание поверхностных пленок, не всегда учитывают в должной степени влияние других условий. Например, в работе [9] приведены данные, показывающие, что при твердых пленках степень

деформации, необходимая для сцепления, практически одинакова для алюминия, меди и свинца и составляет около 50%. Тем самым утверждается, что сцепление не зависит от самого металла. Такая точка зрения опровергается большим количеством опытных данных различных исследователей и, естественно, вызывает справедливую критику [10-12].

Предложенная Парксом [13] «рекристаллизационная» гипотеза схватывания основывается на предположении, что для прочного соединения контактирующих поверхностей металла, кристаллическая решетка которых искажена, необходимо прохождение процесса рекристаллизации с образованием новых, общих для соединяемых поверхностей кристаллов. При этом происходит перераспределение поверхностных пленок таким образом, чтобы они не создавали препятствий для контакта. По мнению автора данной гипотезы, деформация при соединении поверхностей может быть невелика, если поверхности предварительно подвергнуть наклепу. Этот наклеп способствует протеканию рекристаллизационных процессов при пониженных температурах.

А. П. Семеновым [10] приводится еще целый ряд соображений, опровергающих гипотезу Паркса и показывающих, что механизм схватывания не может быть объяснен процессом рекристаллизации. Однако не учитывать рекристаллизацию, рассматривая процесс схватывания при высоких температурах, было бы неправильно. Согласно «диффузионной» гипотезе [14], схватывание происходит благодаря диффузии атомов соединяемых металлических поверхностей независимо от того, происходит соединение при комнатной или высокой температурах.

По мнению авторов этой гипотезы, только путем диффузии атомы двух соединяемых металлических поверхностей могут быть перемешаны так, чтобы образовался непрерывный переход между ними и тем самым был обеспечен тесный контакт.

Местный разогрев двух соприкасающихся и деформируемых поверхностей способствует, по мнению авторов рассматриваемой гипотезы, образованию в местах непосредственного контакта прочных «мостиков» за счет диффузии атомов. Пластическая деформация необходима также и для сближения поверхно-

стей и создания тесного соприкосновения. Схватывание при достижении определенной степени деформации объясняется, как и в «пленочной» гипотезе, образованием, достаточного количества «мостиков» сцепления, прочность которых способна противостоять действию упругих напряжений после снятия нагрузки.

Диффузионная гипотеза, основываясь на решающей роли тепловых процессов, предполагает зависимость прочности схватывания от скорости приложения нагрузки и от дробности деформации, например от величины обжатия за проход. При этом утверждается, что с увеличением скорости деформирования или величины обжатия за проход схватывание улучшается.

Способность к схватыванию взаимно нерастворимых металлов, наблюдаемая в практике, по мнению Н. Ф. Лашко не опровергает «диффузионной» гипотезы, так как, во-первых, скорость диффузии возрастает с уменьшением растворимости, а, во-вторых, в некотором малом объеме возможна взаимная диффузия и тех металлов, которые считаются нерастворимыми друг в друге. При этом отмечается, что процессы диффузии при сварке в условиях обычных: температур проходят «в очень тонком слое и на сравнительно небольшой поверхности металла. . .» [14].

2. 2 Практические результаты сцепления биметаллов

Прочность сцепления слоев биметалла является одной из основных характеристик его качества. Количественно прочность сцепления оценивают средней величиной нормальных (при испытании на отрыв) или касательных (при испытаниях на срез) напряжений, действующих в момент разрушения образца по плоскости соприкосновения слоев.

Не менее важным показателем качества биметалла является сплошность сцепления слоев, отсутствие местных, локальных расслоений. Сплошность и прочность сцепления необходимы для беспрепятственного выполнения различных технологических операций: гибки, штамповки, вытяжки в процессе изготовления изделий из биметалла. Значительная часть аппаратуры,

изготовленной из биметалла, работает в вакууме, где отслоение или низкая прочность сцепления особенно недопустимы, так как, ведут к выходу аппаратуры из строя.

Прочное сцепление слоев необходимо также в биметаллических изделиях, работающих в условиях повышенных температур. Температурные напряжения могут явиться причиной расслоений, если прочность сцепления недостаточна.

Технология получения биметалла должна быть построена таким образом, чтобы обеспечить сплошность и требуемую прочность сцепления. В связи с этим изучение зависимости схватывания от различных технологических факторов представляет большой практический интерес.

Влияние химического состава соединяемых металлов, состояния контактных поверхностей, величины деформации, температуры; туры и т. д. на сплошность и прочность сцепления слоев исследовали в лабораторных и промышленных условиях.

Влияние химического состава на способность металлов к схватыванию исследовано в работах [10, 15, 16–20]; так как химический состав определяет пластические свойства металла, характер поверхностных пленок, процессы диффузии и т. п., то влияние его на схватывание проявляется сложным "образом.

Опыты показывают, что способность к схватыванию чистых одноименных металлов при комнатной температуре неодинакова (таблица 1) расхождение данных по абсолютной величине деформации схватывания объясняется различными условиями опытов: подготовкой поверхности, схемой деформации. Попытка [16] объяснить этими же причинами полученные расхождения в относительной способности металлов к сцеплению менее убедительна.

Наиболее общепринятым считается, что металлы, обладающие повышенной пластичностью и пониженным сопротивлением деформации, проявляют большую способность к схватыванию.

При этом необходимо учитывать способность металла к упругости в процессе деформации, наличие примесей и т. д.

Таблица 1
Способность к схватыванию различных металлов
при комнатной температуре [16]

Металлы	Минимальная деформация схватывания, % по данным			
	А.П. Семенова	Е.И. Астрова	Тайлекота	А.Б. Соутера
1	2	3	4	5
Ag	–	–	50	94
Al	57,1	61	67	60
Pb	62,2	23,5	55	84
Cu	81,0	80,0	90	86
Cd	82,5	80,0	–	84
1	2	3	4	5
Sn	88,4	40,5	86	–
Ni	90,0	92,0	–	89
Zn	90,8	88,0	–	92
Примечание. По данным Тайлекота, для железа и малоуглеродистой стали минимальная деформация схватывания составляет 81%, для индия 10%, для золота 35%				

Влияние примесей в металлах и сплавах на способность к схватыванию установлено как при холодной, так и при горячей совместной деформации. Введение добавок, образующих твердый раствор, повышает величину деформации схватывания, причем влияние различных добавок неодинаково.

Влияние состояния контактных поверхностей на схватывание отмечалось выше. Под состоянием поверхности понимается ее макро- и микрогеометрия, а также наличие окислов, масляных и других адсорбированных пленок и загрязнений.

Практикой производства различных видов биметалла установлено, что контактные поверхности должны быть гладкими, без каких-либо неровностей, способствующих сохранению за-

грязнений воздуха, влаги. Устранение отдельных дефектов на контактных поверхностях производится наждачной зачисткой [21]. В других случаях производится строжка всей поверхности заготовки.

Эксперименты различных исследователей по влиянию макро- и микронеровностей контактной поверхности заготовок на прочность сцепления после совместной пластической деформации дают разноречивые результаты.

В работе [22] исследовали влияние омеднения стальных образцов на сцепление стали и меди. Результаты опытов показали, что омеднение при удалении окисной пленки стали повышает прочность сцепления, причем имеет место оптимальное время омеднения. При меньшем и большем времени омеднения прочность сцепления ниже.

Авторами настоящей книги было исследовано влияние состава и метода нанесения защитного подслоя на схватывание слоев при горячей пакетной прокатке биметалла углеродистая сталь коррозионностойкая сталь.

Исходными материалами для составления многослойных пакетов являлись заготовки малоуглеродистой стали размерами 15–35х200х300 мм, подвергнутые механической обработке по всем поверхностям, и пластины коррозионностойкой стали X18H10T размерами 4–8х190х290 мм, вырезанные из прокатанных и протравленных листов.

Перед сборкой пакета заготовки углеродистой стали зачищали металлической щеткой, а на контактные поверхности пластин коррозионностойкой стали наносили защитные подслои. Затем контактные поверхности обезжиривали ацетоном и собирали пакет. После сборки пакет зажимали в тиски и обваривали по периметру электросваркой.

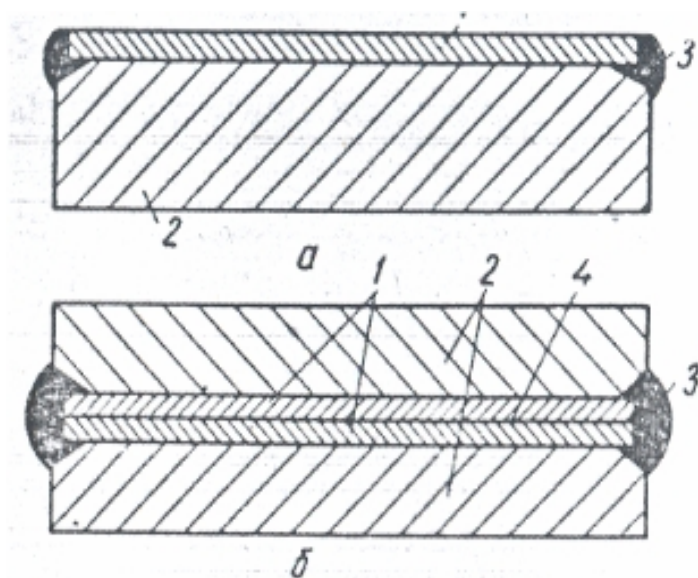


Рис. 6. Схема сборки двухслойного (а) и четырехслойного (б) пакетов [25]:

1 – плакирующий металл; 2 – основной металл;
3 – сварной шов; 4 – разделительный слой

Изготавливали пакеты двух видов: симметричные четырехслойные и несимметричные двухслойные (рисунок 6). В качестве разделительного слоя в четырехслойных пакетах применяли пасту из порошка окиси хрома, магнезита или талька в смеси с жидким стеклом. Пасту наносили кистью на противоположную контактной стороне пластин коррозионностойкой стали ровным сплошным слоем толщиной 0,5–1,0 мм и тщательно просушивали.

Нагрев пакетов вели в газовой камерной печи в течение 1,0–1,5 ч до температуры 1200–1250° С Температуру рабочего пространства печи измеряли сводовой термопарой.

Пакеты прокатывали на одноклетевом стане дуо 450 за 3–10 проходов с суммарным обжатием 30–90%. Температура конца прокатки находилась в пределах 800–1000° С в зависимости от толщины готового раската. После прокатки раскаты охлаж-

дали на воздухе. После обрезки кромок на гильотинных ножницах четырехслойные раскаты разделяли на два односторонне плакированных листа. Полученные листы контролировали на наличие расслоений и испытывали на прочность соединения слоев.

В ходе исследования были опробованы различные виды защитных подслоев и методы их нанесения.

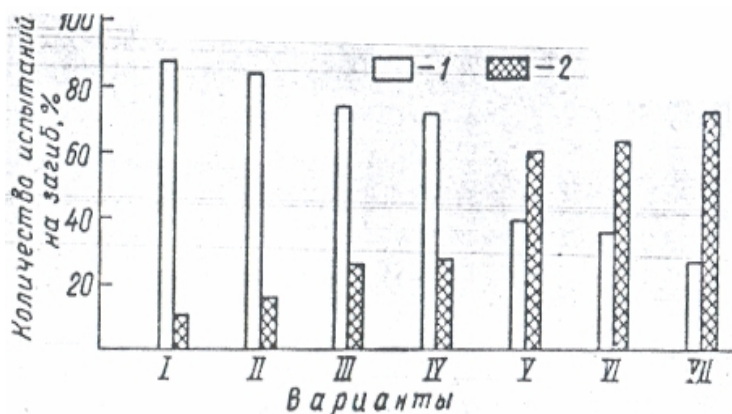


Рис. 7. Зависимость свариваемости слоев в биметалле от вида и способа нанесения защитного покрытия (варианты I-VII, см. таблицу 2) [22].

1 – испытания удовлетворительны; 2 – испытания неудовлетворительны

За один проход наносился слой толщиной от 20 до 50 мкм, были опробованы покрытия толщиной 20, 40 и 60 мкм.

Пластины, напленные никелем, имели желтовато-серый цвет, железом – темно-серый, алюминием – белый. Поверхность пластин шероховатая напленный слой был плотным, отслоений его не наблюдалось.

Для оценки влияния различных покрытий и методов их нанесения на прочность сварки слоев в биметалле было прокатано более 70 пакетов. Результаты испытаний представлены в таблице 2 и на рисунке 7.

Таблица 2
Результаты испытаний биметаллических листов
на прочность сварки слоев [25]

Варианты	Материал защитного подслоя	Способ нанесения	Среднее сопротивление срезу Мн/м^2 (кгс/мм^2)
I	Никель	Металлизация	235 (24,0)
II		Электролитический	211 (21,5)
III		Порошок	243 (24,8)
IV	Алюминий	Металлизация	80,3 (8,2)
V	Железо	Электролитическое	196 (20,0)
VI		Порошок	58,7 (6,0)
VII		Металлизация	2,9 (0,3)

Анализ приведенных данных показывает, что материал, применяемый для защитного покрытия (соединительного подслоя), и метод его нанесения на контактную поверхность существенно влияют на свариваемость слоев. Количество расслоя в биметаллических листах прямо связано со средней прочностью сцепления слоев.

При всех методах нанесения металлический никель является более надежным материалом для защитного подслоя, чем железо. Это объясняется меньшей склонностью никеля к окислению как, при нормальных, так и при повышенных температурах.

Металлическое железо способно окисляться даже при нормальной температуре и поэтому может применяться в качестве соединительного подслоя только в тех случаях, когда организация производства позволяет производить заварку и прокатку пакетов в течение короткого промежутка времени после нанесения защитного слоя.

При нанесении металлического железа методом металлизации количество расслоившихся образцов составило 72% от испытанных. Такой результат объясняется окислением железа уже в процессе нанесения его методом металлизации, в связи с чем защитный слой состоит не из металлического железа, а из его окислов. При нагреве пакета окислы железа передают свой ки-

слород хрому, к получающиеся окислы последнего препятствуют свариванию компонентов в биметалле.

Опробование в качестве защитного подслоя алюминия, наносимого методом металлизации, также не дало положительных результатов. Хотя покрытие алюминием и препятствует окислению лакирующего слоя, сами окислы алюминия являются препятствием для сварки слоев в биметалле.

Рассматривая способы нанесения защитных подслоев, следует отметить, что в результате экспериментов была установлена непригодность порошковых подслоев. Причинами этого являются, во-первых, трудность сохранения равномерного слоя порошка в процессе сборки, сварки и нагрева пакетов; во-вторых, количество воздуха, приносимого внутрь пакета с порошком (воздух составляет 30—80% объема порошкового слоя), настолько велико, что приводит не только к окислению порошка, но и к окислению защищаемой поверхности лакирующего слоя.

Сравнение широко применяемого в настоящее время электролитического покрытия никелем и нового метода нанесения защитного подслоя с применением металлизации показывает, что качество сварки слоев в обоих случаях удовлетворительно как по сплошности, так и по прочности схватывания.

В ряде случаев для защиты контактных поверхностей от окисления применяют обмазку пакета специальными огнеупорными пастами. Так, И. М. Павлов и В. Н. Бринза предложили защитные пасты на основе лаков, алюминиевого и магнезитового порошков и использовали их для получения биметалла сталь + титан [24].

Обмазку составных образцов смесью шамотной глины со спиртом и силикатным клеем применяли также в работе [22] при исследовании сцепления стали с медью.

Однако применение обмазки не препятствует окислению контактных поверхностей за счет воздуха, находящегося внутри пакета. В этом случае приходится прибегать к дополнительным мерам: помещать внутрь пакета металлическую стружку пиррофорного металла или предварительно сдавливать пакет под прессом для удаления воздушных прослоек.

Заканчивая рассмотрение вопросов, связанных с влиянием состояния контактных поверхностей на схватывание, следует отметить большое значение обезжиривания.

Как в экспериментальных работах, так и в производственной практике обезжиривание является необходимой операцией для получения прочного сцепления слоев биметалла. Различные способы обезжиривания, применяемые на практике, будут рассмотрены в гл. IV.

2. 3 Изучение контактной зоны биметалла

Прочность сцепления слоев биметалла определяется в первую очередь граничной зоной, если понимать под граничной зоной саму поверхность контакта и прилегающую к ней область одного и другого металла. Для прочного сцепления необходима металлическая связь, которая достигается, если осуществлен близкий контакт на достаточной площади, отсутствуют окислы, загрязнения и т. д.

В реальных условиях на контактных поверхностях всегда имеется некоторое количество окислов и загрязнений, которые остаются в зоне соединения металлов. Однако в тех случаях, когда эти включения разобщены, сцепление будет достаточно прочным. С. Б. Айибидером и Г. А. Семеновой [50] исследована зона сцепления при холодной сварке алюминия, меди и стали.

2. 4 Изучение пластических свойств биметаллов

Большой интерес представляет предложенное Г. Е. Аркулисом [26] понятие об идеальной осадке многослойного тела, под которой понимается совместная осадка разнородных металлов, осуществляемая при линейном напряженном состоянии во всем объеме тела (рисунок 8).

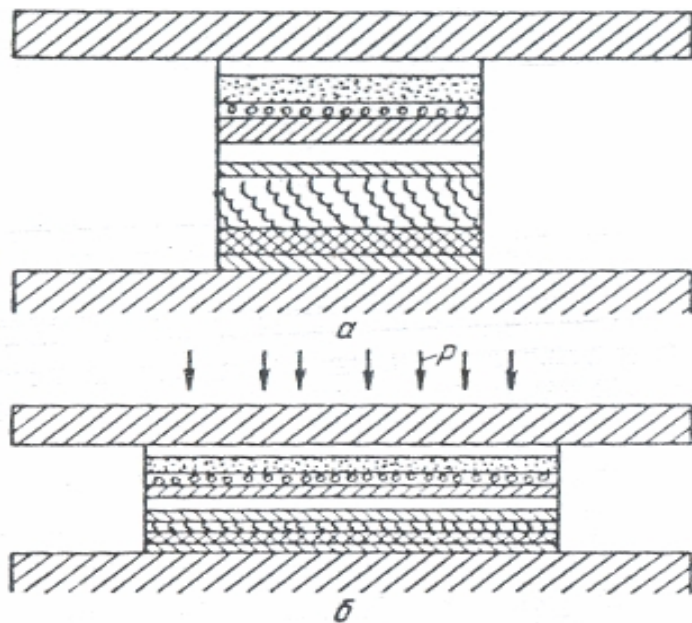


Рис. 8. Схема идеальной осадки многослойного тела [26]:
a – до осадки; *б* – после осадки

3. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ БИМЕТАЛЛОВ

В настоящее время существует большое количество различных методов получения биметаллов, что объясняется большим разнообразием биметаллов по их видам и композициям, а также стремлением найти самый рациональный метод получения для каждого вида.

Несмотря на разнообразие методов получения различных биметаллов, нашедших применение в промышленности, их можно разделить на три группы, причем каждая группа объединяется основным принципом получения заготовки биметалла: а) получение заливкой; б) получение совместной пластической деформацией; в) получение наплавкой, электросваркой или другим методом соединения, не требующим обязательной пластической деформации для создания прочного соединения.

Рассмотрим подробно все перечисленные выше методы производства биметаллов.

3. 1 Изготовление биметаллов литьем заливкой

Этот метод является самым старым и применяется для получения различных видов биметаллической продукции. В основе метода лежит получение двух- или многослойного слитка заливкой одного или более слоев на твердый слой другого состава.

Метод получения биметаллов заливкой применяется как для получения крупных слитков массой (весом) до 13 т, так и для получения небольших слитков массой (весом) в несколько килограмм.

В зависимости от требуемой композиции, формы и массы (веса) слитка этот метод имеет разновидности, которые предусматривают последующую горячую прокатку или иную горячую обработку давлением полученного слоистого слитка с интенсивными частными обжатиями и достаточно большим суммарным обжатием. Соединение слоев биметалла может происходить как в процессе заливки, так и в процессе горячей обработки давлением.

Заливка жидким металлом твердой пластины, помещенной в изложницу, применяется для получения многих видов биметаллов различного назначения. В частности, этот способ применяется для получения коррозионностойких листовых биметаллов сталь + нержавеющая сталь, сталь + медь, сталь + медные сплавы, для получения термобиметаллов, у которых один слой является сплавом на основе цветных металлов, для получения проводниковых биметаллов сталь + медь, для получения инструментального биметалла сталь + инструментальная сталь, для получения износостойкого полосового биметалла для отвалов плугов мягкая сталь + твердая сталь, для получения самозатачивающегося профильного биметалла для плужных лемехов сталь + инструментальная сталь, для получения двухслойного круглого проката для изготовления судовых гребных валов.

Наибольшее распространение в СНГ этот метод получил в производстве коррозионностойкого толстолистового биметалла для химической промышленности и в производстве износостойкой полосовой трехслойной стали для отвалов плугов.

При изготовлении методом заливки коррозионностойких толстых листов на металлургических заводах СНГ (КМК и Коммунарском) применяется следующий порядок основных технологических операций.

В изложницу для отливки слитка массой (весом) 6,5–13 т помещается специально подготовленный сляб из коррозионностойкой стали. Подготовка сляба заключается в его строжке с четырех сторон для удаления окислов (окалины) и поверхностных дефектов, в обезжиривании, в приварке ушек и штырей для монтажа сляба в изложнице, в обмазке сляба с двух сторон — с наружной стороны магнезитовым порошком для предотвращения сварки с металлом и с внутренней стороны наплаткой для улучшения сварки с углеродистой сталью.

В изложницу с помещенной в нее плитой производится сифонная заливка жидкой углеродистой или низкоуглеродистой стали основного слоя из мартеновской печи (рисунок 9, а). Заливаемый металл образует защитный слой – подливку – толщиной 50– 65 мм для защиты поверхности нержавеющей стали от окисления.

Заливка может производиться и для получения этим методом трехслойного биметалла. В этом случае в изложницу помещаются два одинаковых сляба у двух противоположных стенок изложницы или один сляб в центре изложницы (рисунок 9, в, г).

Известен также способ, при котором в центр изложницы помещаются два сляба, сваренных между собой по периметру электросваркой [27]. Плоскости соприкосновения этих слябов между собой смазаны специальным составом для предотвращения сваривания их друг с другом. В качестве такого состава применяют мелко молотый шамот или хромомагнезит. Из такого слитка после прокатки получают два двухслойных листа.

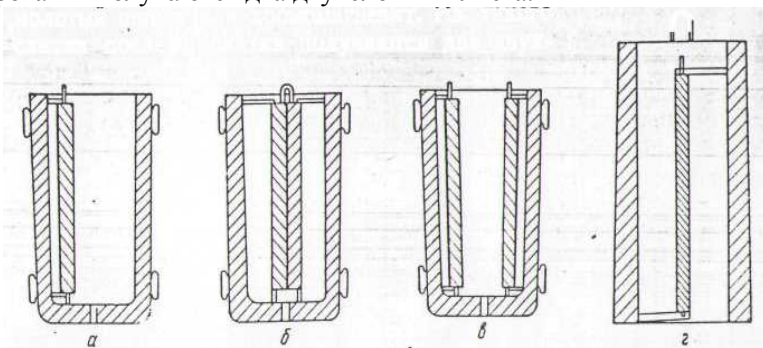


Рис. 9. Изложницы со слябом для получения биметаллических толстых листов [27]: одного двухслойного (а), двух двухслойных (б), трехслойного с наружным расположением плакирующего слоя (в) и трехслойного с сердечником (г)

Однако ввиду сложности этот способ не получил широкого распространения в промышленности.

После охлаждения и извлечения из изложницы биметаллический слиток нагревается в колодцах до температуры прокатки, которая определяется химическим составом основного и плакирующего слоев. Нагретые слитки прокатываются на блюминге на сляб с максимально возможными частными обжатиями. Размеры сляба определяются размерами прокатываемых из него листов с учетом раскроя металла.

После охлаждения со слэбов автогенным резаком удаляется подливка. Слябы зачищаются и затем нагреваются в методических печах и прокатываются на толстолистовых станах на требуемую толщину. Прокатанные листы после правки и обрезки подвергаются термической обработке, повторной правке, травлению и окончательной отделке.

Такой метод имеет тот недостаток, что между плитами коррозионностойкой стали и углеродистой сталью может образовываться пленка окислов, препятствующая надлежащей связи разнородных металлов при прокатке.

Предложен метод, по которому изложница с вставленным в нее слябом из коррозионностойкой стали, помещается в вакуумную камеру с заливкой жидкого металла через отверстие, предварительно закрытое алюминиевой пластинкой [86], которая расплавляется при ударе струи жидкой стали. В процессе разлива в камере поддерживается вакуум.

По другой схеме предложено в вакуумную камеру помещать и качающуюся печь. Этот метод, хотя, по всей вероятности, и может существенно улучшить прочность соединения слэвов, однако его сложно применить при получении многотонных биметаллических слитков для получения толстолистового биметалла. Ввиду этого он может получить лишь ограниченное применение для получения малых отливок из специальных сплавов.

Метод заливки был опробован на Кузнецком металлургическом комбинате и для получения фасонного биметаллического проката [28].

На рисунке 10 приведён чертеж изложницы для слитка массой (весом) 6 т, в который точно на оси устанавливался квадратный сердечник стали ХНЗМ размерами 475 X 475 X 1950 мм со скошенными углами. В изложницу заливали сталь Х18Н9Т сифонным способом. Слитки после соответствующей выдержки для затвердевания передавались к нагревательным колодцам, где нагревались до температуры 1270–1280° С.

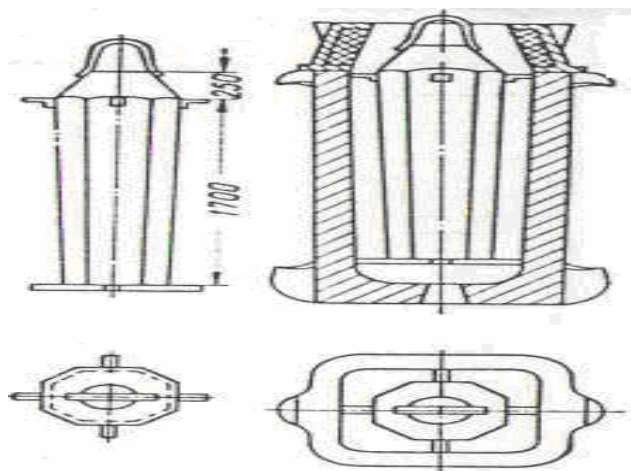


Рис. 10. Изложница слитка со вкладышем для получения круглого двухслойного профиля [28]

Слитки прокатывали сначала на блюминге 1100, а затем без промежуточного нагрева на блюминге 900 на блюмы сечением 210 X 210 и 180 X 180 мм для последующей прокатки на круг диаметром 130–140 и 90 мм. Прокатка на готовые профили круглого сечения производилась на крупносортом девятиклетевом стане 500.

В процессе производства круглой биметаллической стали главная трудность заключается в том, что сердечник в круглом готовом профиле имеет форму, отличающуюся от правильной окружности. На рисунке 11 приведены обводки темплетов круглых биметаллических профилей, полученных на КМК. Отличие от окружности получается больше, если в слиток залить сердечник круглой формы. Это объясняется тем, что при прокатке с кантовкой на 90° между отдельными проходами деформация осуществляется в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Некоторое улучшение формы сердечника может быть достигнуто, если вместо ящичной системы калибровки применять калибровку по системе овал – круг.

Применение квадратного сердечника с сильно скошенными углами улучшает форму сердечника, однако обеспечить правильный круг в сечении сердечника в работе не удалось. Эта задача может быть решена лишь в случае осесимметричной деформации, что имеет место при прессовании. Другой интересной работой по применению прокатки биметаллического слитка на фасонный профиль была работа, выполненная КМК и ЦНИИЧМ¹. На рис. 83 приведен чертеж изложницы для 7,5-т слитка с расположением в ней в квадратной вставки сечением 230 X 230 мм из износостойкой стали Х6Ф1. Изложница заливалась сталью марки Л53, применяемой для производства плужных лемехов.

Двухслойные слитки после нагрева в колодцах прокатывали на блюмы сечением 200 X 110 мм, которые после удаления защитного слоя со стороны

вставки нагревали в методических печах и прокатывали на сортовом стане 500 по специально разработанной калибровке на двоянный лемешный двухслойный профиль.

Метод заливки сердечника расплавленным металлом применяется в промышленном масштабе и при производстве биметаллической сталемедной проволоки, годовое производство которой исчисляется тысячами тонн.

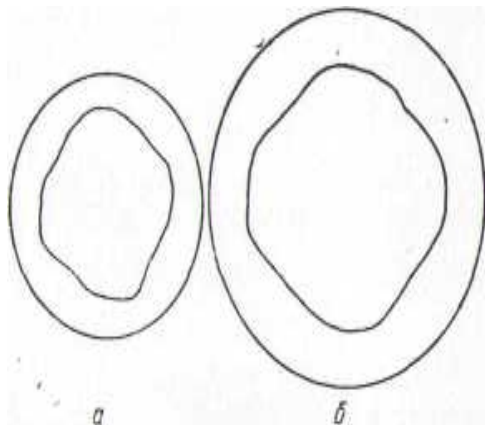


Рис. 11. Сечение круглой двухслойной заготовки, прокатанной на КМК [28]:

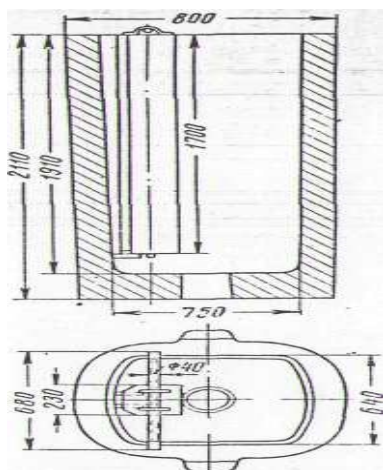


Рис. 12. Изложница слитка с вкладышем для получения двухслойного лемешного профиля [28]

Применение двухслойного слитка с концентрическим расположением сердечника целесообразно при небольшом объеме производства специальных биметаллических фасонных профилей методом горячего прессования (экструдирования). В этом случае прибыльная часть слитка не удаляется перед прессованием. При расположении прибыльной части в сторону пресс-штемпера она уходит в пресс-остаток – неизбежный отход металла при прессовании, и этим экономится металл плакирующего слоя. Если прибыльная часть расположена в сторону матрицы, то при соответствующем подборе геометрии матрицы и прибыльной части она является передним жестким концом, выравнивающим неравномерность деформации переднего конца прессуемого профиля при неустановившемся процессе истечения. И в этом случае достигается экономия металла сердечника.

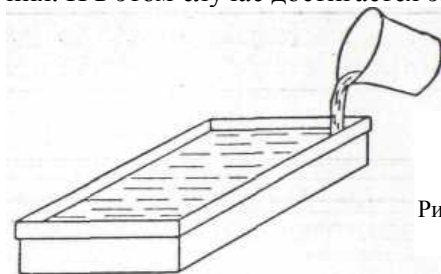


Рис. 13. Схема заливки жидкого металла на твердую пластину [1]

Таким образом, расположение слитка в контейнере целесообразно выбирать исходя из того, какой металл желательно экономить – плакирующий или сердечник.

Заливка жидкого металла на твердую составляющую (без применения изложницы) нашла лишь ограниченное применение для получения небольших партий биметаллов, главным образом в виде стальных лент с плакирующим слоем из цветных металлов и их сплавов – меди, латуни, бронзы и др., т. е. там, где температуры плавления и горячей обработки давлением составляющих резко отличаются.

Ограниченное применение этого метода объясняется тем, что требуется подогрев до высоких температур стального основания и последующая механическая обработка литой поверхности. При больших размерах листов для этого необходимы специальные нагревательные печи и парк строгальных или фрезерных станков.

Для получения биметалла сталь + цветной металл или сплав таким способом применяется следующая последовательность основных технологических операций.

Подготавливается основа – стальная пластина или сутунка. Плоскость разъема подвергается строжке и обезжириванию и на нее наносится слой флюса, способствующий лучшей сварке слоев биметалла. К пластине или сутунке по периметру привариваются бортики для получения противня (рисунок 13).

Полученный противень помещают в подогревательную печь и нагревают 800–950° С, чтобы уменьшить охлаждение заливаемого расплава и обеспечить растворение окислов на границе раздела двух слоев. Далее производится заливка металла или сплава плакирующего слоя в противень.

Применяется также разновидность этого способа, предусматривающая расплавление непосредственно на стальной основе более низкоплавкого плакирующего слоя, например, при изготовлении биметалла сталь + латунь.

После остывания строжкой или фрезерованием с поверхности залитого плакирующего слоя удаляют дефекты литейного происхождения.

Затем двухслойную заготовку нагревают и прокатывают в горячем состоянии до заданного размера по толщине. После обреза и разделения может быть произведена дальнейшая холодная прокатка в случае, если требуется толщина лент или полос менее 2–3 мм и хорошая поверхность. Холодная прокатка таких полос или лент возможна до весьма малых толщин, составляющих десятые или даже сотые доли миллиметра.

Метод заливки жидкого металла на твердую составляющую был применен при получении труб из высокопрочного алюминиевого сплава Д16 с двусторонней плакировкой алюминием марки АД1, с последующим прессованием трехслойной заготовки, холодной прокаткой и волочением на готовый размер. Такие трубы могут быть использованы в тех отраслях промышленности, где наряду с высокими прочностными свойствами и малым удельным весом требуется высокая коррозионная стойкость (самолетостроение, судостроение, автостроение, горное дело и др.). Заготовка для прессования получается заливкой основного металла между двумя предварительно обезжиренными протравленными трубами из плакирующего металла ДД1.

Для получения труб диаметром 12 X 0,75 мм из сплава Д16 с двусторонней плакировкой алюминием был применен следующий порядок основных технологических операций: приготовление плакированных с двух сторон заготовок размерами 77 X 29 X 140 мм методом заливки алюминия между стенками труб 77 X 5 и 35 X 3 мм, вставленных одна в другую; прессование на горизонтальном прессе усилием 7350 кН (750 т) трехслойной заготовки труб размером 32 X 2 мм (вытяжка 21,5, температура 390 – 410° С); отжиг; холодная прокатка на размер 18 x 1 мм; отжиг; волочение на диаметр 13,5 X 0,73 мм; калибровка на диаметр 12 X 0,75 мм; закалка.

Установлено, что при прессовании со смазкой (80% масла Вапорт Т, 10% графита, 10% сурика) трехслойных заготовок, нагретых до 390–410° С, происходит достаточно равномерное истечение всех трех слоев металла, кроме концевых участков труб. Испытание различных углов входного конуса матриц (50, 70 и 90°) показало, что наиболее равномерное исте-

чение получается на матрицах с углом 55° , при этом трубы имеют минимальную длину переднего конца с неравномерным распределением толщины слоев. Большое значение имеет равномерность распределения смазки на поверхности плакированной заготовки и инструмента.

Исследование микроструктуры труб показало хорошую свариваемость между основным металлом и плакировкой. После каждой операции обработки труб сохраняется условие равенства коэффициентов вытяжки слоев.

После закалки и естественного старения трубы характеризуются следующими свойствами: $\sigma = 343\text{--}382 \text{ Мн/м}^2$ ($35\text{--}39 \text{ кгс/мм}^2$), $\sigma_{0,2} = 196\text{--}225 \text{ Мн/м}^2$ ($20\text{--}23 \text{ кгс/мм}^2$) и δ 14–20% при общей площади плакировки в среднем 35% от площади сечения трубы.

С. К. Сафоновым и Н. Г. Евсеевым предложен также способ получения двухслойных труб заливкой с помощью специального устройства для нанесения в трубной гильзе внутреннего слоя цветного металла в расплавленном состоянии. Устройство отличается тем, что с целью автоматизации процесса и экономии цветного металла внутрь трубной заготовки, передвигаемой гидроцилиндром, помещена пустотелая оправка, через которую в зазор нагнетается цветной металл в тестообразном состоянии при помощи насоса.

Последовательная заливка двух металлов в одну и ту же изложницу имеет несколько разновидностей.

Наиболее рациональный способ предложен работниками экспериментального завода ЦНИИЧМ и применен при производстве термобиметаллов [5].

Метод заключается в том, что в разъемную изложницу, имеющую два сифонных канала (рисунок 14), помещается чугунный плоский вкладыш, который по своим размерам точно соответствует размерам одного из слоев слитка термобиметалла с более низкой температурой плавления.

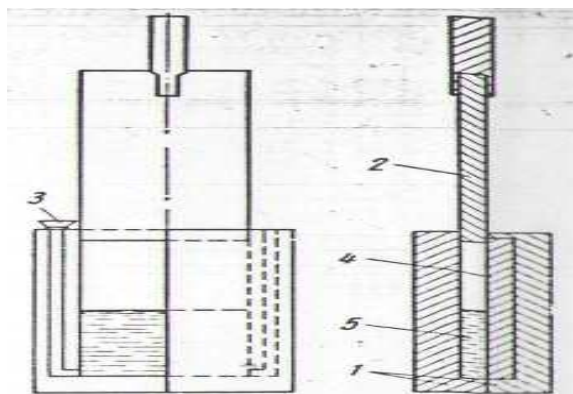


Рис. 14. Схема последовательной заливки слоев биметаллического плоского слитка [5]: 1 – разъемный кокиль; 2 – подъемный вкладыш; 3 – литник; 4 – сплав, залитый в первую очередь; 5 – сплав, залитый во вторую очередь

В изложницу с чугунным вкладышем по первому каналу производится заливка более тугоплавкой составляющей. После небольшой выдержки (30–60 сек) с помощью специального винтового механизма электромотором производится извлечение чугунного вкладыша, и в освободившийся объем по второму каналу производится заливка другой составляющей, имеющей меньшую температуру плавления.

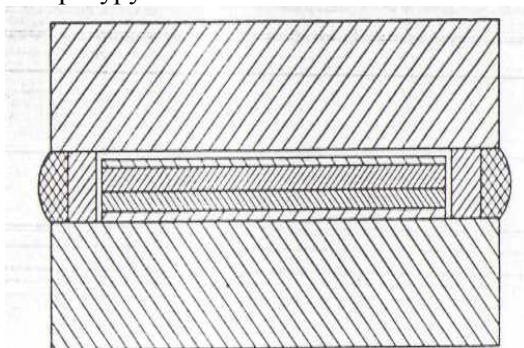


Рис. 15. Конструкция пакета с использованием в качестве пластин предварительно прокатанного биметаллического листа (по патенту Крезю) [1]

3. 2 Изготовление биметаллов пластическим деформированием

Полученные листы помещают между двумя слябами углеродистой стали так, что к поверхности сляба обращена поверхность, плакированная углеродистой сталью (рисунок 15). Затем пакет, как обычно, заваривают по периметру, нагревают и прокатывают с относительно небольшим суммарным обжатием, которого достаточно для сварки углеродистого плакирующего слоя и углеродистого сляба. После обрезки получают два толстых листа углеродистой стали, плакированных нержавеющей сталью.

Этой же фирмой предложен и другой метод получения весьма толстых двухслойных листов с использованием несимметричных пакетов специальной конструкции (рисунок 16). Половину ширины толстого сляба из углеродистой стали прострагивают и на простроганную поверхность кладут пластину из нержавеющей стали, нижняя поверхность которой покрыта тонким слоем никеля. Пластина нержавеющей стали несколько уже половины ширины сляба. Оставшуюся свободную кромку заполняют планкой из мягкой углеродистой стали.

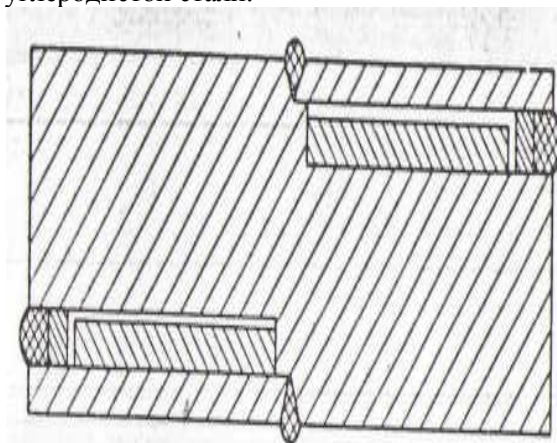


Рис. 16. Поперечное сечение несимметричного пакета для получения двух толстых биметаллических листов [1]

4. ДЕМПФИРУЮЩИЕ СПЛАВЫ В ТЕХНИКЕ БОРЬБЫ С ШУМОМ

4.1 Использование демпфирующих сплавов в технике борьбы с шумом

Предприятия тяжелой промышленности (металлургия, машиностроения, полиграфия и др.) характеризуются высоким уровнем производственного шума. Среди разновидностей шума выделяется ударный шум. Уровни звуковой мощности металлургического оборудования ударного происхождения представлены в работе [31].

Среди этих видов оборудования уровнями шума ударного происхождения выделяются следующие механизмы, приведенные в таблице 3:

- молотковая дробилка (108 дБА);
- дробилка четырехвалковая (115 дБА);
- инерционный грохот коксовый (115 дБА);
- пластинчатый конвейер (104 дБА);
- машина огневой зачистки (123 дБА);
- рабочая клеть 750 (105 дБА);
- дисковая пила (115 дБА);
- устройство для сброса заготовок в карманы (112 дБА);
- летучие ножницы стана 730 (120 дБА);
- ножницы холодной резки (117 дБА);
- приемный карман (114 дБА);
- приемный карман правильной машины (123 дБА);
- агрегат поперечной резки листа стана 2500 (119 дБА);
- агрегат продольной резки листа стана 2500 (117 дБА);
- листоукладчик (115 дБА);
- дрессировочный стан 2500 (125 дБА);
- дрессировочный стан 1500 (120 дБА).

Звукоизоляция и звукопоглощение получили широкое распространение в практике борьбы с шумом и вибрацией [31-34], но основным недостатком этих методов является увеличение габаритов машин, что затрудняет доступ к узлам изолирующего объекта,

Таблица 3

Уровни звуковой мощности металлургического оборудования [31]

Наименование оборудования	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц							Уровень звуковой мощности, дБА	Суммарная длительность воздействия за смену, ч	
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Молотковая дробилка ДР-10	106	108	107	106	102	98	95	87	108	> 4
Дробилка Четырехволковая (УЗТМ)	111	115	114	112	110	108	101	94	115	> 4
Инерционный грохот коксовый	112	111	106	109	109	107	103	96	115	> 4
Пластинчатый конвейер	106	104	101	99	100	99	92	91	104	> 4

Продолжение табл. 3

Питатель-грохот Электровибраци- онный конструкции «Механобр»	103	104	104	108	111	115	95	101	114	> 4
Блюминг 1300: Машина огневой зачистки	104	109	110	116	116	116	117	114	123	> 4
Транспортировка металла по роль- гангам	99	112	113	109	104	96	81	72	112	> 4
Рабочая клеть 750	95	104	102	98	96	90	79	72	105	> 4
Дисковая пила	104	110	110	110	114	113	109	98	118	> 4
Устройство для сброса заготовок в карманы	98	104	106	107	107	118	112	104	112	> 4
Непрерывный заготовочный стан 730/500: Легучие ножни- цы стана 730	85	110	113	110	105	100	113	120	120	< 4

Продолжение табл. 3

Сортопрокатные цехи										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Стан: 300										
Ножницы холодной резки мощностью 600т	103	105	106	109	110	110	105	104	117	> 4
Приемный карман	105	102	104	103	107	109	110	105	114	> 4
Стан: 500										
Ножницы холодной резки мощностью 800т	107	102	106	111	110	116	109	107	115	> 4
Приемный карман правильной машины	95	102	100	112	113	114	111	105	123	> 4
Листопрокатные цехи горячей прокатки										
Стан 2500:										
Агрегат поперечной резки листа	108	107	114	114	115	113	115	107	119	> 4
Агрегат продольной резки листа	100	102	105	113	113	112	107	99	117	> 4
Листоукладчик	115	105	110	115	117	110	103	93	115	> 4
Листопрокатный цехи холодной прокатки										
Стан:										
Дрессировочный 2500	112	116	117	122	123	119	120	120	125	> 4
Дрессировочный 1500	108	108	110	112	115	115	116	113	120	> 4

нарушает условие компактности [35]. Повышение жесткости приводит к нежелательному увеличению массы и в первую очередь металлоемкости оборудования. Специальные демпфирующие устройства, как правило, усложняют конструкцию машины и существенно повышают затраты на эксплуатацию оборудования. Рациональное размещение шумного оборудования может привести к значительному снижению шума [35], но вместе с тем для действующих цехов этот метод нерационален, так как требует значительных капиталовложений для переустройства производственных участков.

Использование неметаллических материалов (резины, пластмасс, полиэтилена, полиуретана) для снижения шума в источнике возникновения затруднено ввиду их низких прочностных свойств, особенно при высоких температурах и в условиях воздействия агрессивных сред, что весьма характерно для металлургической промышленности.

Для деталей оборудования, работающих при ударных режимах используют сплавы на основе железа с повышенной диссипацией звуковой и вибрационной энергий. Преимуществом этого метода являются: простота конструкции, высокая прочность и износостойкость демпфирующих сплавов, более широкий диапазон рабочих температур по сравнению с неметаллами и цветными сплавами. Демпфирующие свойства черных металлов слабо исследованы. Некоторые специалисты считают исследование демпфирующих свойств черных металлов бесперспективным [36]. Другие исследователи для повышения демпфирующих свойств деталей, изменяют геометрию их поверхности [38].

Авторы работы [37] изучили демпфирующие свойства металлов и сплавов и определили самым демпфирующим металлом магниевый ковкий (удельная демпфирующая способность – 49%), далее сплав инкрамют и соностон – 40%, нитинол – 40%, сайлентеллой – 40%, серый чугуны высокоуглеродистый – 19%, никель (чистый) – 18%, железо технически чистое – 16%, мартенситная нержавеющая сталь – 8%, серый литейный чугун – 6%, малоуглеродистая сталь – 4%, ферритная нержавеющая сталь – 3%, ковкий чугун с сфероидальным графитом – 2%,

среднеуглеродистая сталь – 1%, акустическая нержавеющая сталь – 1%, алюминий – 0,3%, сплавы на основе никеля – 0,2%, титановые сплавы – 0,2%, латунь, бронза – 0,2%.

Так, в работе [38] рассмотрены возможности использования межкристаллитной коррозии, в процесса образования трещин от нагрева и пластической обработки листовых материалов с предварительно нанесенными на их поверхности канавками с целью повышения демпфирующих свойств. Оригинальность этого метода очевидна. Однако, следует отметить технологическую сложность подобного режима обработки. Одним из способов снижения шума в источнике его возникновения является применение композиционных материалов. В работах [39,40] предложены биметаллические материалы типа Ст.45 – медь МТ, сталь Х18Н10Т – сплав АМГС, сталь Х18Н10Т- медь М1, сталь 08Х18Н10Т – сталь 08Х18Н10Т, полученные горячей прокаткой, сваркой взрывом для борьбы с производственным шумом. Следует отметить, что данные биметаллические материалы являются дорогими материалами, как по используемым маркам стали, так и по технологии изготовления по сравнению с обычными листовыми конструкционными сталями.

Использование демпфирующих свойств конструкционных сталей и сплавов в технике борьбы с шумом является наиболее перспективным в решении проблемы снижения шума и вибрации на производстве.

Большинство экспериментаторов при поиске малозумных металлических материалов отдали предпочтение сплавам на основе цветных металлов и достигли определенных успехов. Наиболее широкое распространение получили сплавы на основе марганца, магния, меди, никеля и др. металлов. Так, медномарганцевый сплав (51, 91%Мn, 0,35% Si и 47,53% Cu) после закалки (850⁰С, вода) и старения (400⁰С) с последующими охлаждением на воздухе обладает более высокими демпфирующими свойствами, чем известный сплав (52, 01% Мn и 47,51% Cu) [41]. Широкое применение нашли такие сплавы, как «СОНОСТОН» (25-50% Cu, 2,5-6,0% Ni, Мn - остальное) и «ИНКРАМИУТ» (40-48% Мn, 1,4-2,5% Al, Cu-остальное) [42]. Эти же авторы приводят сведения об использовании свинца и

его сплавов в качестве демпфирующих материалов. Сведения о довольно высокой демпфирующей способности медномарганцевых, магниевых и никельтитановых сплавов представлены в работах [43-47].

Другая группа исследователей вела поиск «тихих» сплавов, используя в качестве основы железа, при высоком содержании легирующих элементов. Для легирования использовали довольно широкую гамму элементов (Cr, Co, Mo, W, Nb, Si, Ni, Cu, Al, Ti, V, Ta, Zr, Mn, P, Pb, B и другие металлы) при различном их сочетании и процентом содержании. В ряде случаев удалось получить высоколегированные сплавы (до 40%) с внутренним трением более 5×10^{-3} [48].

В работе [49] дана математическая модель, которая позволила определить количество и значения собственных частот пластины из сплавов, легированных церием, ниобием, никелем при соударении с ударником, а также коэффициент затухания, амплитуду колебания и фазу смещения.

В работе [50] исследованы характеристики демпфирования Fe-Cr (до 30%) – Al (до 10%) – сплавов, выплавленных в вакуумной индукционной печи. Максимальную демпфирующую способность показал сплав на основе Fe с 12% Cr и 3% Al. Предложенный Fe-Co сплав [51] обладает наряду с высокой демпфирующей способностью хорошей обрабатываемостью в холодном состоянии. Таким образом, при оптимальном сочетании элементов в сплаве можно достичь высокого уровня демпфирования. Например, удельная демпфирующая способность титановых сплавов и суперсплавов на основе никеля составляет всего 0,2%, а сплав титана с никелем («Нитинол») обладает в 20 раз большей удельной демпфирующей способностью.

Существенное влияние на демпфирующую способность сплавов оказывает термическая обработка.

Так, исследование влияния режимов термообработки на акустические свойства титанового сплава BT8 позволило установить, что скорость звука меняется в пределах 5090-5260 м/с в зависимости от температуры отжига. При этом оказалось, что существенную роль играет скорость охлаждения после отжига,

что объясняется авторами, как результат фазовых превращений в сплаве [52].

В работе [47] исследовали структуру сплавов Mn-Cu (15-55%), обеспечивающую высокую демпфирующую способность. Термообработка сплава заключалась в закалке из области твердого раствора γ – Mn (800°C и старения при 400, 500 и 600°C). Разновидность превращений в структуре сплавов Mn-Cu авторы объясняют способностью Mn к переменной валентности в металлическом состоянии.

Авторами [53] предложен режим термической обработки титанового сплава, обеспечивающий высокие прочностные и демпфирующие свойства.

Сплавы, обладающие ферромагнетизмом, имеют высокие значения демпфирования. К группе этих сплавов относятся дисперсионно-твердеющий сплав с условным названием НИВКО [43, 54]. Таким образом, уровень демпфирования зависит как от состава сплава, так и от режима термической обработки, определяющей структуру и свойства материала.

Следует учесть, что применение сложнолегированных сплавов высокого демпфирования на основе Mn, Mg, Cu и других элементов ограничено ввиду низкой их стойкости в отношении интенсивного износа при высоких температурах и из-за высокой стоимости. Особенно неприемлемо применение таких сплавов в металлургии и тяжелом машиностроении.

Поэтому актуальной является разработка сплавов на основе железа, обладающих высокой способностью рассеивать энергию звуковых колебаний.

Установлено [55, 43], что при разработке сплавов высокого демпфирования следует добиваться получения устойчивой в условиях эксплуатации метастабильной структуры, характеризующейся большими внутренними напряжениями. Этого можно добиться подбором определенного сочетания элементов в сплаве и определенным для каждого сплава режимом термической обработки, что в совокупности обеспечит повышенные демпфирующие свойства. Исходя из этого, ряд авторов [55] сделали попытку классифицировать сплавы по признакам основного меха-

низма рассеяния звуковой энергии и их химическому составу. Условно сплавы можно разделить на четыре группы:

1. Упругодвойникующиеся сплавы (марганцевомедные и магниевые сплавы);
2. Сплавы с обратимым мартенситным превращением (медноалюминиевые, меднооловянистые, медноцинковые, никельтитановые и железные сплавы);
3. Сплавы с магнитомеханические демпфирование (сплавы на основе железа и сплавы на основе кобальта и никеля);
4. Сплавы с резко выраженной гетерогенной структурой (чугуны, свинцовистые бронзы, алюминиевые сплавы с добавкой цинка и олова).

Хотя предложенная классификация в определенной степени условна, поскольку в некоторых сплавах уровень демпфирования вызывается действием нескольких механизмов, тем не менее, она позволяет в какой-то степени более четко сформулировать задачу по созданию сплавов с определенными свойствами и в том числе на основе железа. Чугуны, первые конструкционные материалы, которые использовались как сплавы с высокими демпфирующими свойствами. В последние годы появились работы, в которых описываются результаты исследований демпфирующей способности чугунов и обсуждаются причины этого явления. В одной из таких работ исследовали влияние химического состава чугунов на их акустические свойства. Увеличение содержания углерода и кремния от 2,0 до 4,0% и от 1,0 до 9,0% соответственно приводят к снижению уровня звукового давления и модуля упругости. Это явление авторы объясняют повышением соударения углерода, которое влечет за собой образование графитовых включений и способствует росту их размеров, что вызывает снижение уровня звукового давления.

Важную роль здесь играет кремний, который сдвигает эвтектическую и эвтектическую точку в сторону высоких температур и низких концентраций углерода, снижая его растворимость в жидком и твердом растворах и способствуя выделению углерода в виде графита. Кремний оказывает сильное влияние на количество и размеры выделившегося графита. Чем больше

содержание кремния в сплаве, тем больше графита, и тем выше будут демпфирующие свойства сплавов. Авторы делают вывод, что структура основаны изученных сплавов несущественно влияет на акустические свойства, так как она не изменяет модуль упругости.

Гетерогенность структуры, которая присуща чугунам, не определяет однозначно высоких демпфирующих свойств. В зависимости от формы графитовых включений и других структурных особенности демпфирующая способность различных чугунов может различаться даже сто раз, что видно из данных работы [56], в которой приведен логарифмический декремент колебаний чугунов и стали:

Белый чугун	2-4
Чугун с шаровидным графитом	5-25
Ковкий чугун	8-15
Чугун с пластинчатым графитом	20-300
Сталь	4

Таким образом, наиболее высокой демпфирующей способностью обладают чугуны с пластинчатой формой графита. Что подтверждено в более поздних работах [57 - 60]. Вторым этапом использования сплавов на основе железа в качестве демпфирующего материала следует отметить применение графитизированных сталей. Так, в работах [61-63] упоминается о повышенной демпфирующей способности графитизированных стали. Имеются работы по изучению влияния химического состава на демпфирующие характеристики стали.

Изучению влияния фазового состава матрицы и химического состава феррита графитизированных сталей на их демпфирующие свойства и на соотношение механизмов демпфирования посвящена работа [64]. Исследовались стали, имеющие примерно одинаковое содержание углерода (таблица 4). Сталь выплавляли в индукционной печи, слитки ковали на прутки диаметром 20 мм. Показано, что демпфирующие свойства изучаемых сталей существенно зависят от соотношения карбидной фазы с образованием графита, обеспечивает тем самым повышение демпфирующих свойств стали. В таблице 5 приведены данные о влиянии фазового состава сталей (соотношение феррита, кар-

бидной и графитной фаз) на демпфирующие свойства сталей, из которых следует, что графитизированные стали имеют максимальную демпфирующую способность в двухфазовой ферритно-графитной области и одним из дополнительных резервов увеличения демпфирующих свойств является легирования сталей такими элементами, которые повышали бы магнитомеханический гистерезис железа.

Таблица 4
Химический состав исследованных сталей [64]

Сталь	Содержание элементов, %						
	C	Si	Al	Co	Mn	S	P
1	2	3	4	5	6	7	8
120C2	1,18	2,50	0,20	-	0,43	0,013	0,014
120ЮО2	1,22	0,14	2,20	-	0,39	0,013	0,10
120К6	1,17	0,28	0,15	5,6	0,45	0,011	0,004
1	2	3	4	5	6	7	8
120Д2	1,19	0,30	0,08	-	0,70	0,025	0,030
120Н4Д2	1,17	0,31	0,08	-	0,62	0,021	0,028
120ЮО2С2	1,15	2,40	1,96	-	0,45	0,011	0,010
120К6ЮО2	1,15	0,21	2,03	5,4	0,47	0,008	0,020
130К6С2	1,27	2,16	0,04	6,3	0,34	0,016	0,018

В работе [65] исследовали характеристики звукоизлучения сплавов после литья, последующих отжига и закалки с низким отпуском. После литья заготовка подвергалась нормализации при комнатной температуре. Отжиг проводили по режиму: нагрев до $A_{c3}+50^{\circ}\text{C}$, выдержка 1 ч, охлаждение с печью. Закалку проводили по режиму: нагрев $A_{c3}+50^{\circ}\text{C}$, выдержка 0,5 ч, охлаждение в масле. Низкий отпуск – нагрев до $200-210^{\circ}\text{C}$, выдержка 0,3 ч, охлаждение в воде.

Исследовали низкоуглеродистые стали, легированные никелем (0,2-1,0 %); хромом (0,2-1,4 %); ванадием (0,1-1,5 %); ниобием (0,1-

1,2%); молибденом (0,1-1,6 %); титаном (0,1-0,4 %); алюминием (0,5-1,4%); бором (0,01-0,4 %); церием (0,05-0,5 %); кальцием (0,005-0,8%); лантаном (0,005-0,8 %); остальное - железо.

Исследованию акустических характеристик сталей, легированных титаном от 0,88 до 4,64% посвящена работа [66]. Анализ полученных результатов позволило авторам сделать вывод о том, что определяющим структуру с высокими демпфирующими свойствами является соотношение содержания титана и углерода. Интересна работа по изучению демпфирующих свойств жаропрочных сплавов, в которой установлено, что при температуре 660⁰С и укрупнении зерна демпфирующая способность сталей резко возрастает [67].

Особый интерес представляют сведения о демпфирующей способности низколегированных сталей. Так, в работах [66, 68] акустическими методами исследовали стальные образцы с различным содержанием углерода, подвергнутые термической обработке, в результате чего они имели различную структуру (феррита, мартенсита, перлита и их смесей). Авторы пришли к выводу, что структура оказывает влияние на скорость звука, сравнимое с влиянием включений и примесей.

Авторами была поставлена цель получения максимального демпфирования при минимальном легировании [69]. Авторы исследовали сплавы 133, 134, 172, 174, 132, 137, 126, 135 в литом, отожженном и закаленном виде. На рисунке 17 представлена микроструктура сплава 133. Демпфирующие свойства сплава 133 $L_A = 83,6$ дБА, $V_{сз} = 700$ дБА/С, $\delta = 3 \cdot 10^2$. Сплав является сложнoleгированным (1,5 % Mn; 1,0 % Ni; 1,5 % Cr; 1,5 % V; 0,5% Nb; 0,5 % Mo; 0,5 % Ti; 1,0 % Al; 0,5 % B; 0,5 % Cu).

Таблица 5

Влияние фазового состава сталей на демпфирующие свойства [64]

Сталь	Номер режима обработки	Термическая обработка	Фазовый состав (основа-феррит)		$Q^{-1} \cdot 10^3$	$H_s \cdot 10^2$ А/м	$B_{(220)} \cdot 10^3$ ряд микроискажения крист. решетки – фазы
			Графит	Цементит			
120Н4Д2	1	Закалка от 700°C + отпуск при 580°C	2,6	6,5	0,5	18,0	11,1
120Д2	1	Закалка от 900°C + отпуск при 620°C	1,3	13,5	0,4	17,2	8,3
120Ю2	1	Закалка от 900°C	4,2	0	2,2	4,3	5,3
	2	+ отпуск при 680°C		7,5			
	3	Отжиг при 800°C Режим 1 + режим 2	2,4 4,2	0	1,0 1,8	5,8 4,0	7,9 5,1
120С2	1	Закалка от 950°C + отпуск при 680°C	4,0	0	2,7	4,6	5,4
120К6	1	То же	3,9	5,5	2,9	8,7	6,9
120Ю2С2	1	Закалка от 950°C + отпуск при 730°C	3,9	0	3,8	3,3	7,4
120К6Ю2	1	Закалка от 900°C + отпуск при 680°C	3,9	0	7,0	4,9	4,8
130К6С2	1	Закалка от 900°C + отпуск при 700°C	4,4	0	8,3	3,9	-

На рисунке видно, что в литом состоянии структура представляет феррит с перлитом. Полный отжиг литого образца приводит к измельчению зерна рисунок 17 (б), так как произошла перекристаллизация. Образовалось новое зерно. Из-за измельчения перлитно-ферритного зерна произошло снижение демпфирующих свойств. После закалки (нагрев до $A_{с3}+50^{\circ}\text{C}$, охлаждение в масле) структура сплава представляет тростомартенсит.

Легирование этого сплава марганцем (1,5%), никелем (1,0%), хромом (1,5%) обеспечило высокие значения скорости затухания звука и логарифмического декремента. Но звукоизлучение (L_A) этого сплава очень высокое - 83,6 дБА, что говорит о том, что легирование марганцем, никелем, хромом, ванадием, в выбранных пропорциях не дает гарантии получения малошумного сплава.

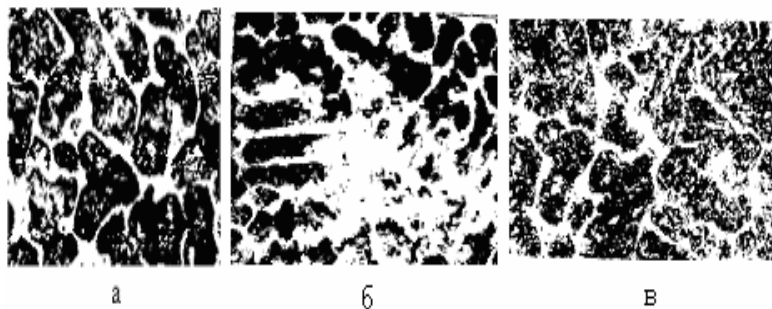


Рис. 17. Микроструктура сплава 133 в литом (а), отожженном (б) и закаленном (в) состояниях 250 [69]

Сплав 134 (рисунок 18) содержит незначительное количество легирующих элементов (Si, Ni, V, Nb, Ti, B), при этом 2,04% Mn; 1,92% Cr; 1,07% Mo; -1,0% Al; 1,5% Ca; 1,5% La. Такая структура обеспечила самое низкое значение L_A (72,1 дБА) и средние значения $V_{сз}$ и δ . Низкое значение звукоизлучения вызвано наличием неметаллических включений крупных размеров [69].

Структура сплава в литом состоянии представляет феррит с ледебуритной эвтектикой. Легирование способствовало появлению перлита.

В отожженном состоянии зерно измельчилось, в основном превалирует феррит.

После закалки структура тростомартенсита. Структуры сплавов 133 и 134 очень похожи, но звукоизлучение очень сильно различается. Основной причиной является содержание неметаллических включений. В процентном отношении неметаллических включений у сплава 133 ($3,943 \times 10^{-2}$), у сплава 134 ($12,326 \times 10^{-2}$) превалируют неметаллические включения очень крупных размеров.

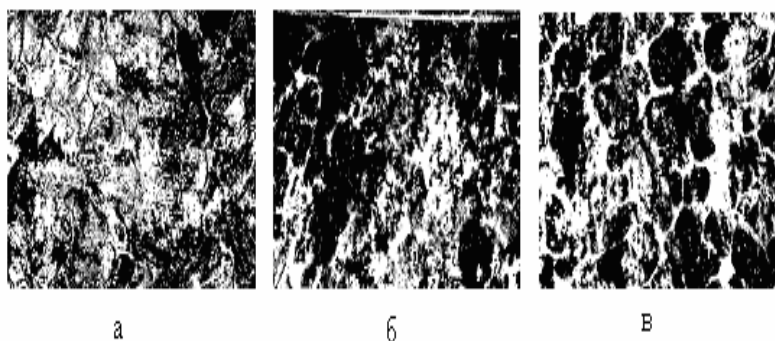


Рис. 18. Микроструктура сплава 134 в литом (а), отожженном (б) и закаленном (в) состояниях 250 [69]

Сплав 172 содержит 1,10% Si; 1,33% Mn; 0,75% Ni; 1,11% Cr; 0,92% V; 0,34% Mo; 0,93% Ti; 1,5% Al; 1,0% La. Сплав характеризуется очень высокими демпфирующими свойствами (скорость затухания звука, логарифмический декремент), но при этом звукоизлучение составляет 82, 8 дБА, что не относит этот сплав к малошумным.

Причиной высоких демпфирующих свойств сплава является высокое содержание неметаллических включений $9,796 \times 10^{-2}$.

Сплав 174 (0,10% C; 1,05% Si; 1,0% Nb; 1,5% Al; 0,7% La) характеризуется следующими демпфирующими свойствами: $L_A = 84,3$ дБА; $V_{сзз} = 140$ дБА/с, $\delta = 0,0116$. Содержание неметаллических включений у сплава очень высокое ($7,593 \times 10^{-2}$), но

анализ характера этих включений показывает, что это в основном очень мелкие неметаллические включения, которые не обеспечивают высокое демпфирование (рисунок 19).

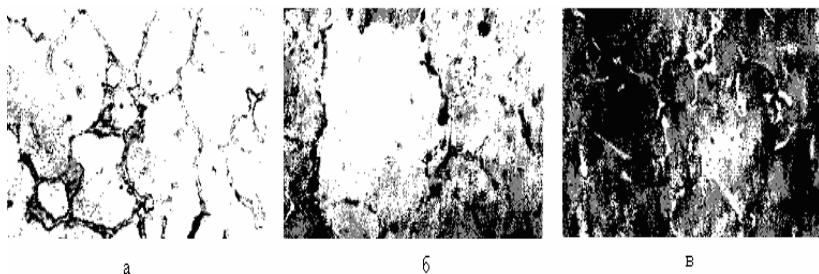


Рис. 19. Микроструктура сплава 174 в литом (а), отожженном (б) и закаленном (в) состояниях 250 [69]

Сплав 132 (2,26% Mn; 1,78% Mo; 1,0% Al) характеризует следующими свойствами: $L_A = 74,3$ дБА; $V_{сзз} = 628$ дБА/с, $\delta = 0,0228$.

Содержание неметаллических включений очень высокое ($7,273 \times 10^{-2}$), что гарантировало низкое звукоизлучение (неметаллические включения среднего размера).

Сплав 137 (по одному проценту Mn, Ni, Nb, Al, 1,5% Cr, 1,5% V, 0,5% Mo, 0,5% Ti, 0,5% Cu) является сложнолегированным, однако демпфирующие свойства его невысоки ($L_A = 83,7$ дБА, $\delta = 0,013$, $V_{сзз} = 261$ дБА/с). Результаты исследования этого сплава показывают, что высокое легирование указанными дефицитными элементами не всегда обеспечивает повышение демпфирующих свойств. На рисунке 4 представлена структура сплава.

Сплав 126 (1,0% Nb; 0,72% Mo; 0,73% Ti; 1,5% Al; 1,0% Ca; 0,5% La; 0,76% Cr; 0,58% Ni; 0,73% V) характеризуется следующими демпфирующими свойствами: $L_A = 80,7$ дБА, $\delta = 0,026$, $V_{сзз} = 533,3$ дБА/с. Содержание неметаллических включений среднее ($4,526 \cdot 10^{-2}$). Структура сплава состоит из смеси феррита и перлита с некоторым содержанием неметаллических включений.

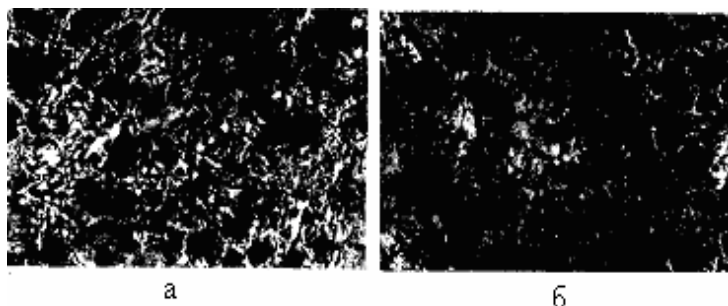


Рис. 20. Микроструктура сплава 137 в отожженном (а) и закаленном (б) состояниях 250 [69]

Сплав 135 (0,4% С; 2,89% Cr; 1,0% Al; 1,0% Ca; 1,5% La; 0,5% Cu) характеризуется относительно высокими демпфирующими свойствами: $La=79,6$ дБА, $V_{сз}=666$ дБА/с, $\delta=0,026$. Это объясняется тем, что хотя общее содержание неметаллических включений не самое высокое ($3,436 \times 10^{-2}$), однако наличие крупных образований обеспечивало высокую диссипацию звуковой энергии.

Микроструктура сплава представлена на рисунке 21. Отжиг снизил $V_{сз}$ из-за того, что получилась высокодисперсная структура (очень мелкая структура). Закалка резко повысила $V_{сз}$ и δ из-за образования мартенситной структуры.

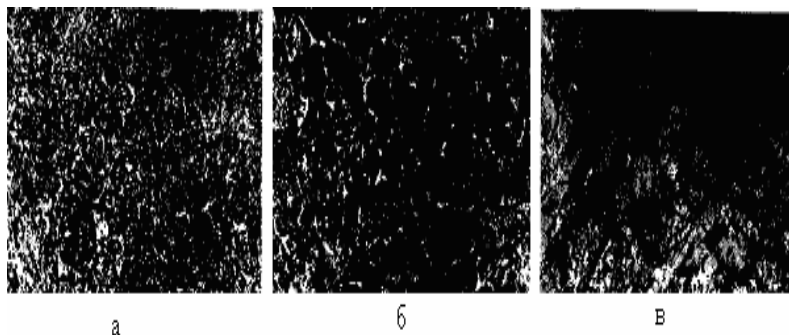


Рис. 21. Микроструктура сплава 135 в литом (а), отожженном (б) и закаленном (в) состояниях 250 [69]

Авторы исследовали демпфирующие и акустические свойства сплавов 723, 724, 730 [70].

Сплав 723 (0,3 % C; 0,3 % Si; 0,3 % Mn; 0,2 % Ni; 0,2 % Cr; 0,8 % V; 0,1 % Nb; 0,2% Mo; 0,4 % Ti; 0,5 % Al; 0,5 % Ce; 0,8 % La; остальное - Fe) представлена на рисунке 22. Характер зависимости УЗД от частоты следующий. В литом состоянии максимум УЗД приходится на частоту 9 кГц. Этот характер УЗД свойствен для большинства сплавов и связан с действием таких механизмов как структурные резонансы (диапазоне 125-500 Гц), закона действия масс (диапазон 500-8000 Гц), волнового совпадения (8000-16000 Гц).

У сплава 724 (0,25% Si; 0,4 % Mn; 0,8 % Ni; 1,2% Cr; 0,5% V; 1,4% Nb; 0,6% Mo; 0,4% Ti; 1,4% Al; 0,8% B; 0,3% Ce; 0,005% Ca; 0,04% La; остальное – Fe) повышенное демпфирование (низкое значение уровня звука) обеспечивает закалка (на 9 дБА). Однако изменение La (уровня звука) после литья и отжига отличается от сплава 723 (рисунок 23) .

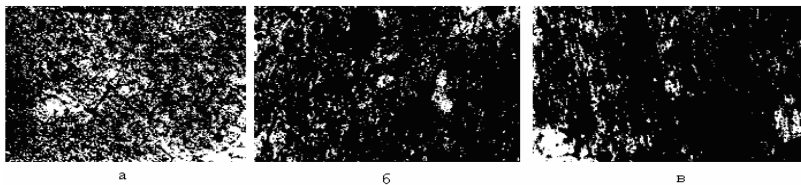


Рис. 22. Микроструктура сплава 723 после литья (а), закалки (б), отжига (в) [70]

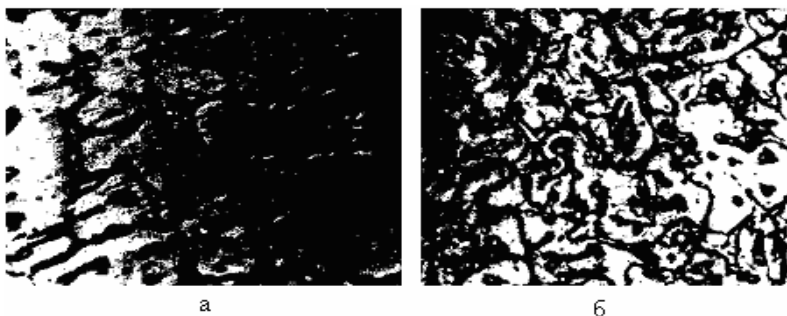


Рис. 23. Микроструктура сплава 724 после литья, 150 [70]:
а – увеличение 270; б – увеличение 150

У сплава 730 (0,05 % С; 0,7 % Si; 0,3 % Mn; 0,5% Ni; 0,3 % Cr; 1,4 % Nb; 0,1% Mo; 0,2 % Ti; 1,0 % Al; 0,4 % В; 0,005 % Са; остальное - Ре) после литья, отжига и закалки, кривая “УЗД - частота” несколько своеобразна - минимальное значение УЗД характерно для отжига (72 дБА). То же самое наблюдается на основных определяющих частотах (9 и 16 кГц). Причиной такого демпфирования является, скорее всего, ускоренный рост зерен и утолщение границ зерен. Закалка не обеспечила повышенное демпфирование из-за образования промежуточных структур - троостита и верхнего бейнита. Также следует обратить внимание, что закалка привела к смещению области структурных резонансов у сплава 730 - минимум УЗД наблюдается не на 250 Гц, как у многих сплавов, а на 1000 Гц (рисунок 24).

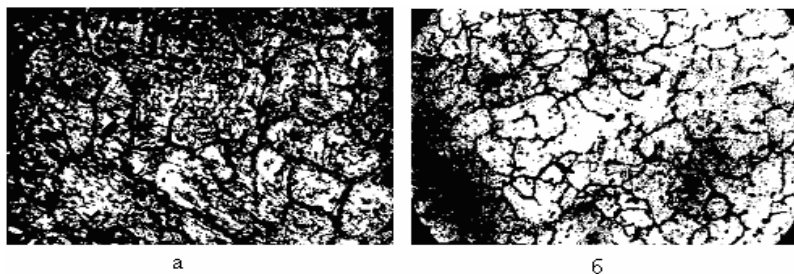


Рис. 24 - Микроструктура сплава 730 после литья, 150 [70]:
а – увеличение 270; б – увеличение 150

Ученые и специалисты уже доказали, что варьирование химического состава может существенно повлиять на виброакустические свойства металлических материалов [66, 70].

В работе была поставлена задача оценить виброакустические характеристики известных, часто применяемых для деталей машин, работающих в режиме ударных нагрузжений – сталей с высокой пластичностью и свариваемостью - 08, 08 кп, 10, 15, 20, 25, 10Г2, 20Г. Кроме этого была поставлена задача улучшить демпфирующие свойства этих сталей за счет легирования ред-

коземельными металлами (РЗМ). Для этого были выплавлены стали, маркированные Т1, Т2, Т3, Т4, Т5, Т6, Т7, Т8 [71].

Акустические свойства исследованных сталей (08, 08 кп, 10, 15, 20, 25, 10 Г2, 20 Г, Т1, Т2, Т3, Т4, Т5, Т6, Т7 и Т8) представлены в таблице 6, рисунок 25. Вибрационные характеристики сталей были исследованы по значениям уровней виброускорения (УВУ) и общему уровню виброускорения (ОУВУ).

Таблица 6
Средние значения уровня звука и звукового давления
исследованных сталей послековки [71]

№ п/п	Мар- ки- ровка стали	Уровень звукового давления, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Уровень звука, дБА
		250	500	1000	2000	4000	8000	16000	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	08	46,60	41,90	47,60	51,80	71,00	98,90	99,80	90,40
2	08 кп	43,40	42,50	43,80	52,80	73,60	102,50	104,70	96,10
3	10	50,00	45,00	51,20	60,40	73,60	92,20	100,60	93,30
4	15	57,80	54,20	52,10	60,80	78,80	105,70	97,40	96,60
5	20	40,30	40,10	43,60	54,40	76,10	99,60	104,50	95,0
6	25	43,60	41,30	42,80	51,50	76,40	101,90	105,40	95,80
7	20 Г	57,80	54,30	52,20	60,30	78,40	105,60	97,20	96,40
8	10 Г2	43,30	42,50	50,00	58,40	77,60	104,40	105,60	97,80
9	Т1	42,10	44,30	48,30	49,60	70,00	96,20	99,40	91,60
10	Т2	51,10	46,40	43,50	60,20	75,20	98,40	100,10	94,40

Авторы [72] предлагают: шумопоглощающее и шумоизолирующее покрытие для детали, склонной к вибрации;

В работах [73-74] для снижения шума и вибрации предлагаются: звукопоглощающая стенка; многослойный звукопогло-

щающий элемент; демпфер для трубы со спиральными канавками; способ и устройство для измерения шума; устройство для гашения вибраций; звукопоглощающий корпус оборудования, создающего шум; способ и устройство для уменьшения шума, в частности, для искусственных сердечных клапанов и систем кардиопротезирования.

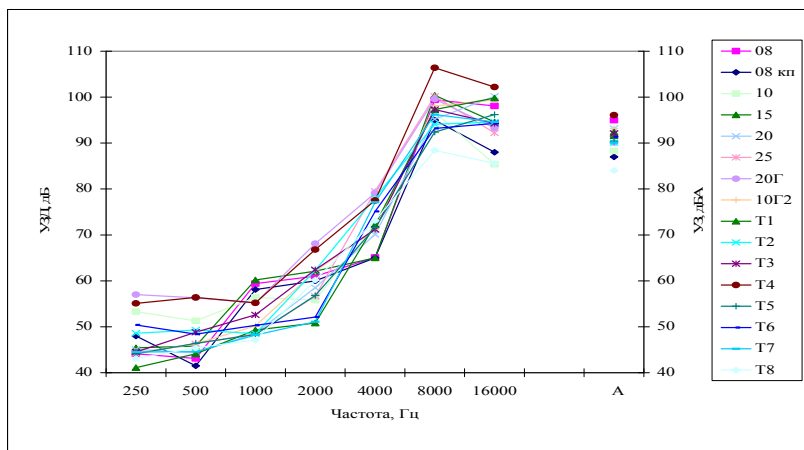


Рис. 25. Средние значения уровня звука и уровня звукового давления исследованных сталей после ковки [71]

В работе Д.К. Сулеева [75] одной из задач исследования являлось сравнение одновременно замеренных акустических и вибрационных спектров образцов после соударения с ударниками. При увеличении вибрации образца следует ожидать увеличения издаваемого им звука, а при уменьшении – уменьшения, т.е. закономерности изменения кривых УВУ и УЗД должны быть похожими. Однако экспериментальные исследования легированных сплавов марок 11-53 на некоторых частотах выявили аномалии – рост одной из характеристик при снижении другой, а также неизменность значений одной из характеристик при заметном изменении другой - эффект неадекватности (ЭН).

После соударения с ударником $d=9,5$ мм (сплав 13) эффект неадекватности (таблица 6-9, рисунок 10-13) имеет место в диапазоне частот 4 - 8 кГц ($\Delta UBV=10,6$ дБ при $\Delta UЗД=0$) и 16 - 31,5 кГц ($\Delta UBV=10,9$ дБ при $\Delta UЗД=-1,3$ дБ). После соударения с ударником $d=12,7$ мм ЭН наблюдается в диапазонах частот 2 - 4 кГц ($\Delta UBV=-1,2$ дБ при $\Delta UЗД=6,1$ дБ), 4-8 кГц ($\Delta UBV=11,8$ дБ при $\Delta UЗД=-1,1$ дБ). После соударения с ударником $d=15,85$ мм в диапазоне частот 1 - 2 кГц уменьшение вибрации ($\Delta UBV=-2,6$ дБ) сопровождается увеличением звукоизлучения ($\Delta UЗД=8,6$ дБ). После соударения с ударником $d=18,25$ мм ЭН наблюдается в диапазонах частот 1 - 4 кГц ($\Delta UBV=-1,2$ дБ при $\Delta UЗД=7,1$ дБ) и 4 - 8 кГц ($\Delta UBV=4,8$ дБ при $\Delta UBV=-0,8$ дБ).

После соударения с ударником $d=9,5$ мм (сплав 21) в диапазоне частот 2-4 кГц при снижении вибрации происходит неадекватное увеличение звукоизлучения ($\Delta UBV=-15,4$ дБ при $\Delta UЗД=6,2$ дБ). После соударения с ударником $d=12,7$ мм ЭН наблюдается в диапазонах частот 2-4 кГц ($\Delta UBV=-9,4$ дБ при $\Delta UЗД=6,5$ дБ) и 4-8 кГц ($\Delta UBV=10,8$ дБ при $\Delta UЗД=-10$ дБ). После соударения с ударником $d=15,85$ мм противоположные эффекты неадекватности проявляются в диапазонах 2-4 кГц ($\Delta UBV=-7,0$ дБ при $\Delta UЗД=7,3$ дБ) и 4-8 кГц ($\Delta UBV=14,4$ дБ при $\Delta UЗД=-0,2$ дБ).

После соударения с ударником $d=18,25$ мм также противоположные ЭН имеют место в диапазонах 1-2 кГц ($\Delta UBV=-1,9$ дБ при $\Delta UЗД=8,5$ дБ) и 4-8 кГц ($\Delta UBV=21,2$ дБ при $\Delta UЗД=-7,9$ дБ).

Эффект неадекватности имеет место после соударения со всеми ударниками. После соударения с ударником $d=9,5$ мм (сплав 22) при уменьшении вибрации происходит увеличение звукоизлучения в диапазоне частот 1 - 4 кГц ($\Delta UBV=-4,7$ дБ при $\Delta UЗД=14,4$ дБ), 4 - 8 кГц ($\Delta UBV=-8,0$ дБ при $\Delta UЗД=205$ дБ) и 8 - 16 кГц ($\Delta UBV=-1,4$ дБ при $\Delta UЗД=10,5$ дБ), в диапазоне частот 16-31,5 кГц наоборот при увеличивающейся вибра-

ции наблюдается уменьшение звукоизлучения ($\Delta UBV = 1,8$ дБ при $\Delta UЗД = -10,1$ дБ). После соударения с ударником $d=12,7$ мм при уменьшающейся вибрации наблюдается неадекватное увеличение звукоизлучения в диапазонах частот 2-4 кГц ($\Delta UBV = -1,4$ дБ при $\Delta UЗД = 14,6$ дБ) и 8-16 кГц ($\Delta UBV = -1,4$ дБ при $\Delta UЗД = 17,4$ дБ). После соударения с ударником $d=15,85$ мм также наблюдается ЭН в диапазонах частот 2-4 кГц ($\Delta UBV = -0,8$ дБ при $\Delta UЗД = 5,0$ дБ) и 8-16 кГц ($\Delta UBV = -2,0$ дБ при $\Delta UЗД = 7,3$ дБ). После соударения с самым массивным ударником $d=18,25$ мм в диапазоне частот 1-2 кГц при снижении вибрации наблюдается увеличение звукоизлучения ($\Delta UBV = -0,1$ дБ при $\Delta UЗД = 8,7$ дБ), а в диапазоне 16-31,5 кГц на фоне неизменяющейся вибрации наблюдается значительное уменьшение звукоизлучения ($\Delta UBV = 0$ при $\Delta UЗД = -10,5$ дБ).

После соударения с ударником $d=9,5$ мм (сплав 43) в диапазоне частот 1-4 кГц при уменьшающейся вибрации звукоизлучение возрастает ($\Delta UBV = -4,1$ дБ при $\Delta UЗД = 15,2$ дБ). После соударения с ударником $d=12,7$ мм в диапазоне частот 1-2 кГц вибрация возрастает, а звукоизлучение уменьшается ($\Delta UBV = 2,2$ дБ при $\Delta UЗД = -7,8$ дБ), а в диапазоне 2-4 кГц наблюдается обратная картина ($\Delta UBV = -3,2$ дБ при $\Delta UЗД = 5,9$ дБ). После соударения с ударником $d=15,85$ мм ЭН имеет место в диапазоне частот 1-4 кГц ($\Delta UBV = -1,5$ дБ при $\Delta UЗД = 14,6$ дБ). После соударения с ударником $d=18,25$ мм звукоизлучение возрастает, а вибрация уменьшается в диапазоне частот 1-4 кГц ($\Delta UBV = -1,9$ дБ при $\Delta UЗД = 15,3$ дБ) и наоборот гасится звук при растущей вибрации в диапазонах 4-8 кГц ($\Delta UBV = 22,8$ дБ при $\Delta UЗД = -1,1$ дБ) и 16-31,5 кГц ($\Delta UBV = 0,5$ дБ при $\Delta UЗД = -10,0$ дБ).

После соударения с ударником $d=9,5$ мм (сплав 51) в диапазоне частот 1 – 2 кГц при уменьшении вибрации ($\Delta UBV = -2,4$ дБ) наблюдается неадекватное увеличение звукоизлучения ($\Delta UЗД = 9,1$ дБ), то

же самое в диапазоне частот 2 – 4 кГц ($\Delta UBU = -0,5$ дБ при $\Delta U3D = 7,4$ дБ) и 8 – 16 кГц ($\Delta UBU = -4,6$ дБ при $\Delta U3D = 18,9$ дБ). После соударения с ударником $d=12,7$ мм эффект неадекватности наблюдается в диапазоне частот 1–2 кГц ($\Delta UBU = -3,8$ дБ при $\Delta U3D = 9,4$ дБ). После соударения с ударником $d=15,85$ мм в диапазоне частот 4 – 8 кГц наблюдается неадекватное увеличение звукоизлучения при уменьшении вибрации ($\Delta UBU = -1,1$ дБ при $\Delta U3D = 4,8$ дБ). После соударения с ударником $d=18,25$ мм в диапазоне частот 1–2 кГц уменьшающаяся вибрация сопровождается увеличением звукоизлучения ($\Delta UBU = -0,4$ дБ при $\Delta U3D = 10$ дБ), а в диапазоне частот 4 – 8 кГц наблюдается обратная картина – увеличении вибрации происходит при уменьшении звукоизлучения ($\Delta UBU = 9,8$ дБ при $\Delta U3D = -0,5$ дБ).

Таблица 7

УЗД и УВУ сплава 13

Частота, кГц	УЗД, дБ	УВУ, дБ
1	64,9	54,8
2	73,6	63,9
4	80,3	67
8	80,7	77,6
16	104,2	86,1
31,5	102,9	97

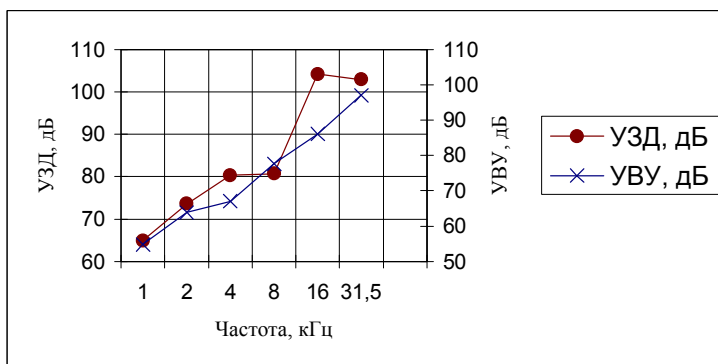


Рис. 26. Акустический и вибрационный спектры сплава 13
после соударений с ударником d=9,5 мм [75]

Таблица 8

УЗД и УВУ сплава 13

Частота, кГц	УЗД, дБ	УВУ, дБ
1	71,2	59,4
2	81,3	61,8
4	87,4	60,6
8	86,3	72,4
16	113,8	94,6
31,5	100,1	92,2

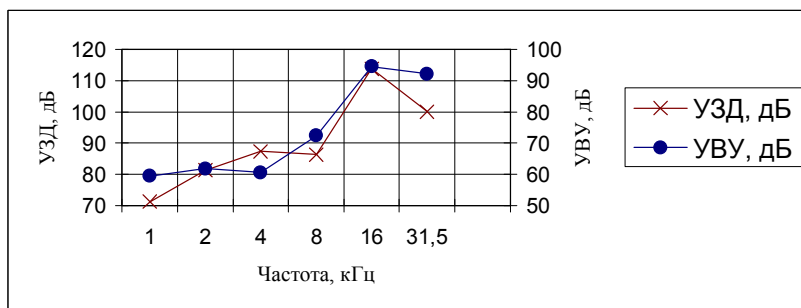


Рис. 27. Акустический и вибрационный спектры сплава 13
после соударений с ударником d=12,7 мм [75]

Таблица 9

УЗД и УВУ сплава 13

Частота, кГц	УЗД, дБ	УВУ, дБ
1	77,1	64,8
2	85,7	62,2
4	92,1	70
8	93	75,6
16	111,8	95,9
31,5	109,8	85,4

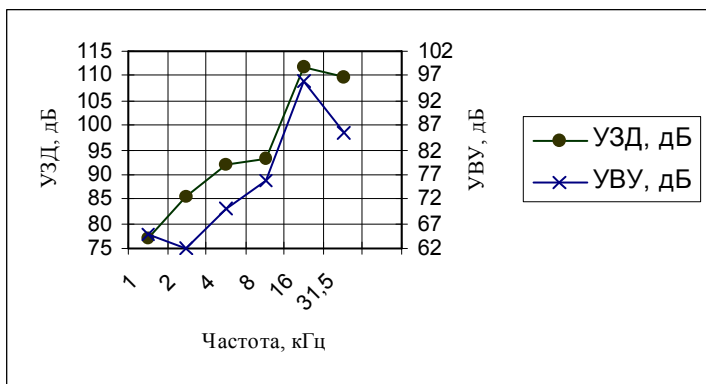


Рис. 28 . Акустический и вибрационный спектры сплава 13 после соударении с ударником d=15,85 мм [75]

Таблица 10

УЗД и УВУ сплава 13

Частота, кГц	УЗД, дБ	УВУ, дБ
1	81,6	68,6
2	88,7	67,4
4	96,5	66,2
8	95,7	71
16	118,1	102,6
31,5	114,3	101,8

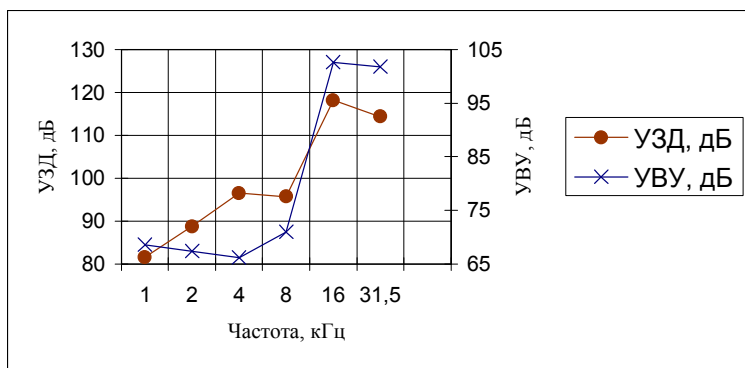


Рис. 29. Акустический и вибрационный спектры сплава 13 после соударении с ударником d=18,25 мм [75]

В работе [76] проведено 28 опытов на протяжении четырех этапов. Выполнения условия планирования полного факторного эксперимента позволило рассчитать коэффициенты регрессии после каждого этапа исследования и выявить оптимальные составы легированных сталей, обладающих повышенными демпфирующими свойствами.

Расчет собственных частот прямоугольной стальной пластины исследованы авторами [77].

Исследовалась демпфирующая способность строительных сталей повышенной и высокой прочности в зависимости от амплитуды напряжений методом определения логарифмического декремента колебания. Испытывали стали марок 10Г2С1, 14Г2, 14ХГС, 09Г2, 15ХСНД, 15Г2СФ, 15ХГ2СФР, 15ХГ2СФМР в состоянии поставки и после термической обработки (отжига, нормализации и закалки с последующими отпуском при 450⁰ и 650⁰С). При незначительных амплитудах напряжений ($\tau = 4$ кгс/мм²) максимальное рассеяние энергии имеют образцы после отжига и в состоянии поставки, наименьшее – после закалки с отпуском при 450⁰С и нормализации (рисунок 30). Закалка в этом [78] эксперименте способствовала резкому снижению демпфирующих свойств. Отпуск при 650⁰С этой закаленной стали при амплитуде $\tau = 14$ кгс/мм² обеспечивает максимум демпфирующих свойств. Демпфирующая способность строительных сталей объясняется авторами двумя механизмами демпфирования: затуханием, обусловленным магнитной природой материала, и затуханием немагнитного происхождения.

До сих пор исследователи не установили функциональной связи между демпфирующими и другими физико-механическими свойствами, что подтверждается многочисленными, часто противоречивыми данными исследователей. Также, исследователи не пришли к единой оценки демпфирующей способности материала, до сих пор это характеристика не гостирована, поэтому нет стандартных приборов для испытания.

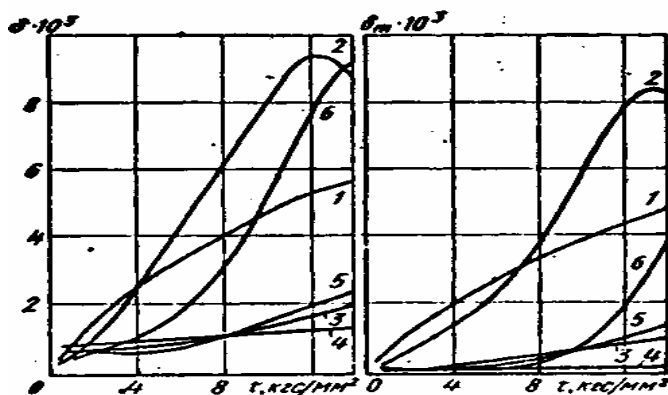


Рис. 30. Амплитудная зависимость логарифмического декремента колебания δ и магнитной составляющей колебания δ_m стали 10Г2С1 после различной термической обработки [78]:
 1 – состояние поставки; 2 – отжиг при 880°C; 3 – нормализация при 880°C; 4 – закалка от 880°C; 5 – 6 – закалка от 880°C с отпуском при 450°C и 650°C соответственно

Одной из важнейших демпфирующих характеристик металлов является внутреннее трение, зачастую устанавливается зависимость между звукоизлучением и внутренним трением металлических материалов. Так, в работе [79] между скоростью затухания звуковых колебаний и внутренним трением обнаружена прямо пропорциональная зависимость. Максимальному значению скорости затухания звука соответствует максимум внутреннего трения изученных сплавов. Между уровнем звукового давления и внутренним трением обнаружено обратно пропорциональная зависимость у исследованной стали [79].

Закаленная сталь состоит из мартенсита и некоторого количества остаточного аустенита. Повышение содержания углерода в мартенсите увеличивает его тетрагональность. Расчеты показывают, что искажения решетки в мартенсите имеют ту же величину, что и при напряжениях около 200 кг/мм² [80]. Появление диффузионного пика, связанного с миграцией внедренных атомов в α -решетке мартенсита, в поле малых напряжений невозможно, так как переориентировка осей тетрагональных искажений мартен-

сита привела бы к большим объемным изменениям. Этим объясняется исчезновение 40-градусного максимума при полном мартенситном превращении. Следовательно, источником диффузионного внутреннего трения в закаленной стали может быть переориентировка близко расположенных пар атомов углерода или азота в остаточном аустените, обладающем г. ц. к. кубической решеткой.

В углеродистых сталях закалка, создавая высокую концентрацию дефектов кристаллической решетки, значительно уменьшает модуль сдвига (τ^2) во всем исследованном интервале температур [80]. Исключение представляет сталь, содержащая 0,015% С, что обусловлено отсутствием в ней мартенситного превращения в связи с малым содержанием углерода.

Приведенные экспериментальные данные указывают на сложную природу обсуждаемого максимума внутреннего трения в закаленной стали и, на наш взгляд, подтверждают высказанное предположение. Максимум при 200° С возникает в связи с тем, что одновременно происходят диффузия углерода в остаточном аустените под действием напряжений и миграция углерода в области дислокаций, образовавшихся в ходе мартенситного превращения и под действием термических напряжений. Диффузионное затухание в основном сказывается на температурном положении максимума и меньше влияет на его высоту.

Анализ пика при 280° С показывает, что он обусловлен диффузией растворенных углеродных атомов в γ -железе и имеет одно время релаксации. Положение и высота этого пика не изменяются при ступенчатом отпуске до 500° С и выдержке по одному часу через каждые 100° С. Только отпуск при 600° С устраняет этот максимум. Рентгенографически показано, что при таком отпуске аустенит полностью исчезает и остается только феррит. Вычисление энергии активации по положению этого пика при разных частотах дает $H = 40000 \pm 2000$ кал/г-ат. Это соответствует литературным данным, согласно которым величина энергии активации диффузии углерода в аустените повышается при легировании хромом.

Особо следует остановиться на влиянии отпуска на внутреннее трение и модуль сдвига. В работе [80] приведены результаты измерений внутреннего трения и модуля (частота колебаний

~ 1 пер/сек) у углеродистых сталей, подвергнутых отпуску при 100-600° С.

Для учета внутреннего рассеяния энергии при конструировании и расчете деталей машин необходимо прежде всего установить его связь со структурой и свойствами материалов, что дает возможность рационально использовать металлы и сплавы.

Одной из причин рассеяния энергии при колебаниях является упругое несовершенство материала, возможность возникновения пластической деформации в отдельных зернах в упругой области напряжений. Амплитудно-зависящее внутреннее трение связано с факторами, обуславливающими возможность возникновения микропластической деформации и прежде всего с микроструктурой металла или сплава.

Отожженные углеродистые стали обладают практически одинаковым внутренним трением при содержании до 0,6% С. Это показывает, что величина внутреннего трения мало зависит от толщины прослоек феррита, пока они велики. При увеличении содержания углерода свыше 0,6% внутреннее трение снижается, причем особенно резко у заэвтектоидной отожженной стали в связи с появлением сетки структурно свободного цементита. Это свидетельствует о существенном воздействии структуры на затухание.

Затухание колебаний в металлах и сплавах прежде всего определяется типом пластической составляющей структуры (например, в черных металлах феррит, аустенит и графит), что, конечно, связано с особенностями ее кристаллического строения. Другие структурные факторы также могут оказывать влияние, но играют при этом второстепенную роль. В некоторых работах показан рост амплитудно-зависящего (внутреннего трения с увеличением зерна в стали. В ряде случаев, когда размеры включений второй фазы становятся соизмеримыми с масштабам микросдвигов, рассеяние энергии может быть обусловлено этими включениями. Тогда дальние перемещения потоков дислокаций тормозятся, что приводит к уменьшению характеристик внутреннего трения.

Одновременное исследование механических характеристик и внутреннего рассеяния энергии, проведенное в работе [80], показало качественную связь между ними. Чем выше пределы текучести и прочности металлов и сплавов, тем более низко амплитудно-

зависящее внутреннее трение. Автор этой работы исследуя склонность эвтектоидной стали У8 к рассеянию колебаний, доказал, что внутреннее трение обусловлено не только состоянием структурно свободного феррита, но также и ферритной составляющей в перлите.

Сравнение декрементов для доэвтектоидных сталей при напряжениях, равных одинаковой доле предела выносливости или предела текучести каждой из них, показало, что внутреннее рассеяние энергии колебаний не зависит от содержания углерода в стали. Например, при напряжениях, равных пределу выносливости углеродистых сталей ($0,1 \div 0,8\%$ С), декремент в среднем оставался постоянным и составлял $\delta \approx 0,028$.

Влияние термической обработки на внутреннее трение сталей 20 и 45 изучалось в работе [80]. Было показано, что в большинстве случаев более стабильным структурам отвечает большая величина внутреннего рассеяния энергии. Отжиг обеспечивает наибольшее относительное затухание, возможное для данной стали. Интенсивность воздействия содержания углерода на относительное затухание крутильных колебаний различна для отожженных и нормализованных углеродистых сталей. Сравнить характеристики амплитудно-зависящего внутреннего трения можно только при одинаковой термической обработке стали. Внутреннее рассеяние энергий в сталях с перлитной, сорбитной и трооститной структурами изучалось в работах [80].

Исследование затухания колебаний в закаленной пружинной стали У8 в зависимости от температуры отпуска проведено в работе [80]. Показано значительное снижение относительного затухания при отпуске в интервале $460-650^{\circ}\text{C}$, что объяснялось дроблением блоков α -фазы. Аномальное снижение относительного затухания колебаний при температурах отпуска $450-526^{\circ}\text{C}$ в дальнейшем подтвердилось и при исследовании пружинной стали 55С2 [80]. Изменение относительного затухания колебаний в зависимости от температуры отпуска мартенсита или от температуры распада аустенита в этой работе определяли при напряжениях кручения 10 и 15 кг/мм².

В работах [80] амплитудно-зависящее внутреннее трение в закаленных и отпущенных углеродистых сталях изучали на образцах

диаметром 7 мм и рабочей длиной 50 мм. Предварительно отожженные (1 час) образцы подвергали закалке и отпуску в течение одного часа при температурах 100; 200; 300; 400; 500; 600°C. Принятые температуры охватывали весь температурный интервал отпуска исследованных сталей. Микропластическое внутреннее трение характеризовалось относительным затуханием свободных крутильных колебаний, которое измеряли на специальном приборе с тензометрической записью виброграммы.

Полученные данные показывают, что жесткость закаленных образцов повышается при отпуске до 200° С (рисунок 31).

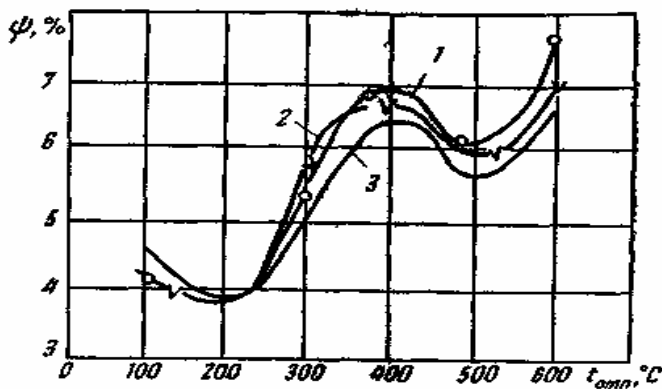


Рис. 31. Относительное затухание колебаний в зависимости от температуры отпуска углеродистой стали при напряжении кручения на периферии образца $\tau = 16 \text{ кг/мм}^2$ [80]: 1 - сталь 50А; 2 - У7А; 3 - У9А [80]

Как известно, закаленная сталь состоит из остаточного аустенита и мартенсита. Отпуск образцов при 200° С приводит к превращению аустенита в отпущенный мартенсит.

Увеличение внутреннего рассеяния энергии при хромировании можно объяснить образованием поверхностных микротрещин (концентраторов напряжений), а также искажениями поверхностной кристаллической структуры.

Имеется ряд работ по изучению зависимости между звукоизлучением стали и ее физико-механическими характеристика-

ми. Изучая колебания пластины при ее ударном возбуждении, авторы работы [81] сделали вывод, что основную роль в формировании звуковой волны играет упругие свойства, масса соударяющихся тел скорость соударения. Однако, исследование акустических свойств стальной проволоки позволило сделать противоположный вывод о том, что звучание проволоки зависит преимущественно от внутреннего трения и не зависит от упругих свойств материала [82]. Было установлено, что на скорость затухания звуковых колебаний оказывают влияние, кроме внутреннего трения, предел текучести, модуль Юнга, коэффициента Пуассона, количество движения при соударении, геометрические размеры пластины и ударника. Исследуя влияние упругих свойств, массы, плотности, межатомного расстояния, твердости и чистоты металла на характеристики демпфирования, авторы [83] показали, что основными факторами, влияющими на уровень звукового давления является упругие и инерционные свойства соударяющихся тел. В эксперименте был выявлен ряд закономерностей, а именно увеличение межатомного расстояния и уменьшение плотности металла способствовало росту звукоизлучения. Авторы отмечают, что плотность оказывает большее влияние на уровень звукового давления, чем модуль упругости. Твердости металла не повлияла на уровень звукового давления. Рост демпфирующих способности чистых металлов влечет за собой повышение скорости затухания звуковых колебаний. Сплавы показали себя более звонкими материалами по сравнению с чистыми металлами. Однако в работах [59, 83] была установлена обратно пропорциональная зависимость между модулем упругости и скоростью затухания звуковых колебаний.

Анализ литературных данных по вопросам исследования и разработки сплавов высокого демпфирования и влиянию различных физико-механических характеристик на диссипативные свойства показывает, что замечен прогресс создания сплавов с повышенными демпфирующими свойствами на основе марганца, магния, меди и других металлов, вместе с тем недостаточно изучены самые распространенные конструкционные материалы – стали. Следует отметить существующие противоречия в во-

просе о влиянии различных легирующих элементов и видов термической обработки на демпфирующие свойства сплавов. Практически отсутствуют сведения об акустических характеристиках низколегированных сталей. Известны высокодемпфирующие сплавы на основе марганца, никеля, а также графитизирующая способность кремния, однако изучения совместного влияния этих элементов низколегированных сталях не проведено. Отсутствуют данные о влиянии редкоземельных металлов (РЗМ) на демпфирующие свойства сталей при ударном возбуждении.

Изучение поведения основных акустических характеристик твердого тела - коэффициента поглощения и скорости ультразвука, являющихся чрезвычайно структурночувствительными параметрами, позволяет исследовать динамику движения дислокаций и их взаимодействия, как с самой решеткой, так и другими ее дефектами. Достоверность оценки механизмов такого взаимодействия и их разделения определяется, прежде всего, точностью полученных значений поглощения и скорости ультразвука в кристаллических телах [85].

Измеряемое импульсным методом затухание упругой волны включает в себя «истинное» поглощение среды и целый ряд дополнительных энергетических потерь, обусловленных: 1) дифракционными явлениями, связанными с конечностью размеров пьезоизлучателей, 2) не строгой параллельностью торцев образца, ведущей к отклонению волнового вектора от нормали к плоскости излучателя, 3) преобразованием упругой энергии в электрическую при отражении звуковой волны от пьезопластики и 4) трансформацией продольных волн в поперечные (и обратно) на боковых поверхностях цилиндрического образца [85].

Существенные трудности имеют место и при экспериментальном определении скорости звука в твердых телах.

Зависимость демпфирующей способности от продолжительности и температуры отпуска для литых сплавов имеет такой же характер, как и для сплавов, обработанных давлением, однако длительность отпуска, соответствующая максимуму демпфирования, в несколько раз меньше. Вследствие химической и структурной

неоднородности литых сплавов скорость превращения закаленных сплавов при отпуске возрастает настолько быстро, что его можно выполнять при 350° С [34].

Для литых сплавов по сравнению со сплавами, обработанными давлением, характерен и более высокий максимальный уровень демпфирования. Так, обработанный давлением сплав Г75Д25 после термической обработки имеет максимальный уровень демпфирования $\psi=30\%$ при амплитуде деформации $\gamma = 0,75 \cdot 10^{-3}$ и $\psi=15\%$ при величине $\gamma = 0,05 \cdot 10^{-3}$. Для литого сплава этого же состава уровень демпфирования составляет соответственно 50 и 30% [34].

Демпфирующие свойства конструкционных материалов уже давно являлись предметом тщательного изучения.

К числу последних работ в этой области следует отнести монографию по вибропоглощающим свойствам конструкционных материалов [34].

5. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ БИМЕТАЛЛОВ

5.1 Материал для исследования

При работе машин и механизмов, работающих в режиме трения и соударений генерируется шум повышенного уровня. Эти детали и механизмы частот изготавливают из стандартных сталей 30, 35, 40, 45, 50Г, 45Г2. Для исследования акустических и демпфирующих свойств этих сталей использовали методику моделирования ударных процессов посредством шара (ударник) и пластины (образцы из сталей 30, 35, 40, 45, 50Г, 45Г2 и вновь разработанных сплавов).

Демпфирующая способность металлических материалов характеризуется совокупностью акустических и физико-механических характеристик, таких как уровень звукового давления, скорость затухания звука, внутреннее трение, удельное электросопротивление, плотность, модуль сдвига, модуль Юнга и рядом металлографических признаков. В настоящем исследовании проведенная серия экспериментов имела целью установление закономерностей, обуславливающих взаимосвязь структурно-чувствительных факторов и микроструктуры с параметром оптимизации – уровнем звука конструкционных низколегированных сталей, состав которых был задан матрицей планирования эксперимента.

В качестве объекта исследования были выбраны стали с содержанием углерода от 0,27% до 0,56% т.е. диапазон доэвтектоидных сталей. Таким образом, была поставлена задача дать оценку демпфирующих свойств группе среднеуглеродистых сталей, используемых в условиях соударений. Содержание легирующих элементов в стали планировалось в соответствии с методом МПЭ. Добавки легирующих элементов изменялись в следующих пределах: кремния от 0,19% до 0,31%, марганца от 0,48% до 1,2%, хрома от 0,25% до 0,29%, церия от 0,2% до 0,8%. Выбор марганца, хрома в качестве легирующих элементов в железоуглеродистых сплавах объясняется следующим. Как показал анализ работ [60, 65, 70,] сплавы, обладающие повышенными демпфирующими свойствами, содержали в каче-

стве легирующих элементов хром и марганец. Следует учесть, что марганец относится к одним из самых распространенных элементов на земле (0,09%) и широко применяется в сплавах на основе железа, обладающих высокими демпфирующими свойствами. Добавки марганца от 2% до 4% также влияют на демпфирующие свойства сплавов.

Выбор хрома в качестве легирующего элемента объясняется тем, что этот элемент также широко применяется в сплавах высокого демпфирования. Добавки хрома к другим металлам существенно изменяют их свойства и создают возможности для получения широкого ассортимента различных очень ценных материалов. Незначительно упрочняя феррит, хром не снижает его вязкость и известно более 3-х тысяч сталей и сплавов, в состав которых входит хром.

Выбор церия объясняется тем, что РЗМ зачастую при легировании придавали дополнительные качества, возможно усиление диссипативных свойств.

При разработке сплавов высокого демпфирования одним из основных критериев является недопустимость существенного снижения прочностных свойств. Поэтому одной из причин выбора в качестве легирующих элементов железоуглеродистых сплавов хрома, марганца и ванадия, явилось то, что среди основных легирующих элементов (наиболее часто применяемых) эти элементы сильнее других упрочняют феррит.

Опытные сплавы выплавляли в тигельной индукционной печи емкостью 12 кг с основной футеровкой. Исходным материалом служил листовой металл из стали 10. Легирование производили 97,6%-ым металлическим марганцем, 77,5%-ым FeSi и 75 %-ым феррохромом. Углеродосодержащей добавкой служил синтетический чугун с содержанием углерода 3,9%. Стали отличали в металлическую изложницу размерами 210x115x115 мм.

В работе было отмечено существенное влияние технологии обработки на общий уровень звукового давления листовой малоуглеродистой стали. С целью исключения влияния технологии обработки на характеристики демпфирования исследуемых сталей, выплавку, прокатку, механическую обработку проводили по единой технологии на одном и том же оборудовании.

Таблица 11

Химический состав и механические свойства
исследованных сталей

№ п/п	Марка стали	Химический состав, % вес				Механические свойства					
		C	Si	Mn	Cr не более	Ce	σв, МПа	δ ₅	ψ	a _н , Дж/см ²	σ _Т МПа
								%			
1	30	0,27-0,35	0,17-0,37	0,5-0,8	0,25	-	500	21	50	80	300
2	35	0,32-0,40	0,17-0,37	0,5-0,8	0,25	-	540	20	45	70	320
3	40	0,37-0,45	0,17-0,37	0,5-0,8	0,25	-	580	19	45	60	340
4	45 н	0,42-0,50	0,17-0,37	0,5-0,8	0,25	-	610	16	40	50	360
5	50Г н	0,48-0,56	0,17-0,37	0,7-1,00	0,30	-	630	15	40	50	380
6	45Г2 после за- калки и от- жига	0,41-0,49	0,17-0,37	1,4-1,8	0,3	-	850	13	45	45	700
7	30ХГСА	0,30	1,05	0,95	0,9	-	1080	10	45	49	850
8	50Х н	0,46-0,54	0,17-0,37	0,5-0,8	0,8-1,10	-	1100	9	40	40	900
9	ГЕ-1	0,40	0,19	0,48	0,25	0,8	500	12	42	61	310
10	ГЕ-2	0,30	0,20	0,62	0,28	0,7	510	14	43	65	311
11	ГЕ-3	0,50	0,25	0,85	0,29	0,4	560	12	35	50	377
12	ГЕ-4	0,45	0,31	1,2	0,27	0,2	610	9	40	38	410

Образцы перед ковкой нагревали в лабораторной печи до температуры 1200°C с выдержкой 1 час. Слитки ковали с использованием ковочного молота до полос с конечными размерами 700x90x10(12) мм. После каждого прохода полосы помещали в печь для достижения температуры 1200°C. Образцы для исследования акустических и физико-механических свойств вырезали из кованных полос по схеме, изображенной на рисунке 32.

Чистота поверхности после механической обработки соответствовала 7-му классу. Отклонение задаваемых размеров не превышали 0,1 мм. Акустические свойства определяли после горячейковки, затем эти же образцы подвергали нормализации, цементации, закалке и низкому отпуску. Режим нормализации - нагрев до $A_{c3} + 50^\circ\text{C}$, выдержка 1 час и охлаждение в воздухе. Закалку проводили по режиму: нагрев до $A_{c3} + 50^\circ\text{C}$, выдержка 0,5 часа, охлаждение в масле. Нагревание образцов в муфельной лабораторной печи производили в кварцевых ампулах в вакууме с разряжением порядка 10^{-6} атм.

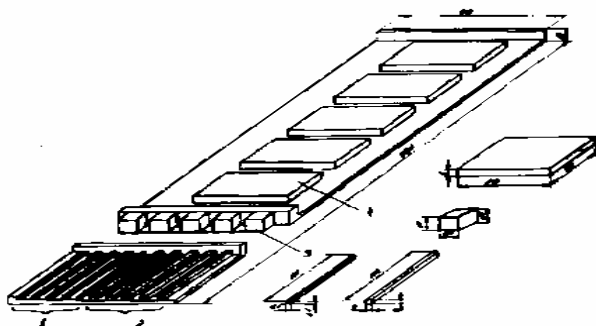


Рис. 32. Схема вырезки образцов для исследования:
1 - внутреннего трения; 2 - удельного электросопротивления;
3 - металлографического анализа; 4 - уровня звукового давления

5. 2 Исследование акустических свойств металлических материалов

Исследование характеристик звукоизлучения проводили на установке для измерения характеристик звукоизлучения соударяющихся шара и пластины (рисунок 33).

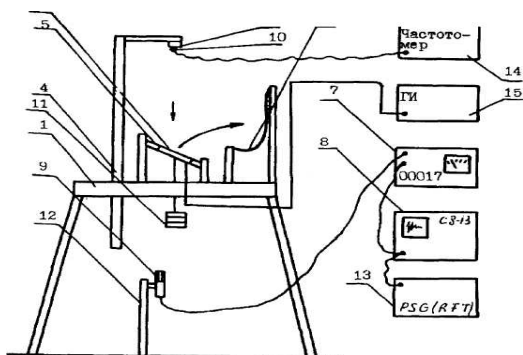


Рис. 33. Установка для измерения характеристик звукоизлучения соударяющихся шарика и пластины:

- 1 - стол; 2 - электромагнит; 3 - ловитель шаров; 4 - стойка;
 5 - капроновые нити; 6 - образец (пластина); 7 - шумомер;
 8 - осциллограф С8-13; 9 - микрофон; 10 - шарик (ударник); 11 - груз;
 12 - штатив; 13 - самописец; 14 - частотомер;
 15 - генератор импульсов

Установка состоит из стола 1, на котором крепится стойка 4, электромагнит 2, образец 6 (пластина), натянутый капроновыми нитями 5, ловитель шаров 3, груз 11 для контроля натяжения образца. Измерительная аппаратура к установке следующая: шумомер 7 марки Октава-101А, микрофон которого 9 крепится под образцом на штативе 12; частотомер 14, генератор импульсов 15, осциллограф 8 марки С8-13, самописец 13 марки PSG.

Установка работает следующим образом. Шар (ударник) 10 совершает свободное падение с помощью электромагнита 2, происходит соударение шара 10 с образцом 6. Звук соударения шара и пластины фиксируется микрофоном 9 шумомера 7. Кроме того, установка позволяет измерять как длительность соударения за счет генератора импульса 15 и частотомера 14, так и скорости затухания звука за счет самописца 13 модели PSG-101. Характеристики демпфирования можно рассчитать за счет осциллографа 8 модели С8-13.

5. 3 Измерение демпфирующих характеристик

Звуковой импульс от соударения исследуемого образца с ударником (шарик) фиксировали не только шумомером, но и регистрировали с помощью запоминающего осциллографа. Зафиксированный сигнал фотографировали и далее определяли характеристики демпфирования: логарифмический декремент, скорость затухания звука. Относительное рассеяние и внутреннее трение определяли расчетным путем.

На рисунке 34 показан сфотографированный звуковой импульс стали 35. Логарифмический декремент этого сплава определяли следующим образом:

$$\delta = \frac{l}{n} \ln \frac{A_0}{A_n} = \frac{1}{43} \ln \frac{36}{6} = 0,0416, \quad (1)$$

где A_0 - начальная, максимальная амплитуда звукового импульса;
 A_n - конечная, минимальная амплитуда звукового импульса;
 n - число импульсов на экране осциллографа.

Относительное рассеяние: $\psi = 2 \cdot \delta = 2 \cdot 0,0416 = 0,0832$,

Внутреннее трение: $Q^{-1} = \frac{\delta}{\pi} = \frac{\psi}{2\pi} = 0,0132$,

Скорость затухания звука: $V = \frac{74 - 70}{0,045} = 90 \text{ дБА/с}$,

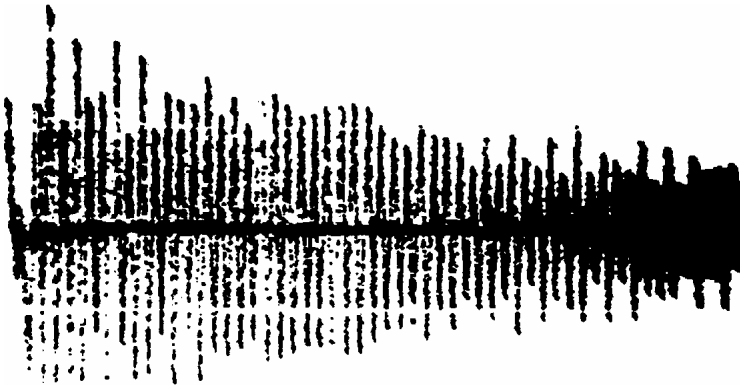


Рис. 34 . Осциллограмма затухания звукового импульса
от соударения стали 35

Временной интервал экрана осциллографа составляет 0,005 секунды. Весь интервал делится на $9 \times 5 = 45$ подинтервалов. Таким образом, цена деления временного интервала осциллографа составляет 0,00011 секунды.

Внутреннее трение определяли не только расчетным методом. Учитывая то, что в пластине при ударе возбуждаются в основном изгибные волны, внутреннее трение разработанных сплавов исследовали методом изгибных колебаний. Использовали автоматический прибор для непрерывной регистрации внутреннего трения при изгибных колебаниях стержней с электромагнитным возбуждением в диапазоне высоких частот (950-1000 Гц), амплитуд 10^4 и температур 20-600°C.

Измерения внутреннего трения проводили с помощью дискриминатора и счетчика импульсов, рассчитывая по формуле:

$$Q^{-1} = \frac{\delta}{\pi} = \frac{1}{\pi \cdot n} \ln \frac{V}{V_n}, \quad (2)$$

где δ – логарифмический декремент;

V – начальная амплитуда;

V_n – конечная амплитуда;

n – число колебаний, совершенных образцом в диапазоне от начальной до конечной амплитуды.

Аппаратурные потери определяли с помощью кварцевого стержня, устанавливаемого вместо образца. Такие измерения позволили оценить величину фона установки, которая значительно меньше 10^{-5} , что на порядок ниже минимальных значений затухания испытуемых образцов. Более подробно методика исследования изложена в работе. Характеристики внутреннего трения исследовали на образцах размерами 1,5x1,5x100 мм после горячей прокатки в диапазоне частот 950-1000 Гц при комнатной температуре 20°C. На каждом образце проводили пять замеров.

5. 4 Стандартные методы исследования

Определение механических характеристик разработанных сплавов проводили стандартными методами.

Измерение твердости осуществляли на приборах Бринелля и Роквелла. Металлографические изучения микроструктуры осуществляли с помощью микроскопов МИМ-7 и МИМ-8 при 300-кратном увеличении.

Размер зерна определяли согласно ГОСТ 5639-65. Определение неметаллических включений проводили методом Л (варианты Л1 Л2) - линейным подсчетом включений согласно ГОСТ 177870. Для некоторых сплавов механические характеристики (Ств) определяли расчетным способом.

5.5 Изготовление биметаллических образцов

Для получения биметаллического образца использовали для основного слоя сталь ГЕ-1 и сталь 30. Плакирующий слой – алюминиевый сплав АЛ2 (Al-Si). К основному слою с помощью клея «Момент» приклеивали плакирующий слой. Для этого поверхности сцепляемых поверхностей очищали, покрывали тонким слоем клея, а затем прикладывали друг к другу с усилием и выдерживали под грузом 20 кг в течение 24 часов.

Образец МС – сталь 30, размерами 50х50х5 мм.

Образец БМ50 – сталь 30, размерами 50х50х5 мм, при этом образец состоит из двух пластин – стали 30 (50х50х2,5 мм).

Образец ГЕБМ – 1 (С) – основной слой – сталь ГЕ-1 (таблица 12); плакирующий слой – алюминиевый сплав АЛ2; размеры образцов 50х50х2,5 мм, соударение происходит по стальной пластине;

Образец ГЕБМ-1 (А) – основной слой – сталь ГЕ-1, плакирующий слой – алюминиевый сплав АЛ2; размеры образцов 50х50х2,5 мм, соударение происходит по алюминиевому сплаву.

Образец ГЕБМ – 2 (С) – основной слой – сталь ГЕ-2 (таблица 12); плакирующий слой – алюминиевый сплав АЛ2, соударение происходит по стальной пластине;

Образец ГЕБМ-2 (А) – основной слой – сталь ГЕ-2 (таблица 12); плакирующий слой – алюминиевый сплав АЛ2, соударение происходит по алюминиевому сплаву АЛ2.

Образец ГЕБМ – 3 (Т) – основной слой – стал 30, плакирующий слой – сталь 30 размеры пластин 50х50х2,5 мм соударение происходит по термообработанной пластине (закалка низкий отпуск)

Образец ГЕБМ – 4 (НТ) – основной слой – стал 30, плакирующий слой – сталь 30 размеры пластин 50х50х2,5 мм, соударение происходит по нетермообработанному слою (образец после литья и горячейковки)

Образец ГЕБМ – 5 (основной слой – сталь 30; плакирующий слой – сталь 30. Размеры образца 40х40х2,5 мм.

5.6 Обработка экспериментальных результатов

Методы обработки данных наблюдений базируются на положениях теории вероятностей и математической статистики. В настоящей работе обработку экспериментальных данных проводили по методу наименьших квадратов.

Среднее значение уровня звука (уровня звукового давления) определяли по формуле:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, i = 1, n \quad (3)$$

где n – количество измерений УЗ (УЗД);

x_i – определенное значение УЗ (УЗД).

Отклонение каждого измерения УЗД находим по формуле

$$d_i = x_i - \bar{x} \quad (4)$$

где $\bar{x}$ – среднее значение УЗД;

а дисперсию опыта определяли по формуле:

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (5)$$

среднеквадратичное отклонение находили по формуле:

$$S = \sqrt{S^2} \quad (6)$$

В случае одномерного эмпирического распределения произвольным моментом порядка k называется сумма k -х степеней отклонений результатов наблюдений от произвольного числа c , деленная на объем выборки n :

$$m_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - c)^k, \quad (7)$$

где k может принимать любые значения натурального ряда чисел. Если $c=0$, то момент называют начальным. Начальным мо-

ментом первого порядка является выборочное среднее $\bar{x}$. Действительно, $\bar{x}$ можно определить и по формуле

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - 0) \quad (8)$$

которая равносильна формуле (1).

При $c = \bar{x}$, как уже отмечалось при рассмотрении формулы (3), момент называется центральным. Первый центральный момент

$$m_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^1 = 0. \quad (9)$$

Второй центральный момент (см. формулу (3))

$$m_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (10)$$

представляет собой дисперсию S^2 эмпирического распределения.

Несмещенную оценку для σ^2 (σ^2 - дисперсия теоретического распределения) можно найти по формуле

$$\bar{S}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (11)$$

Выборочные среднеквадратические отклонения соответственно могут быть найдены по формулам:

$$S = \sqrt{S^2}, \quad \bar{S} = \sqrt{\bar{S}^2} \quad (12)$$

Из других моментов чаще всего используют моменты третьего и четвертого порядка:

$$m_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3, \quad (13)$$

$$m_4 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4. \quad (14)$$

Выборочное значение коэффициента вариации ν , являющееся мерой относительной изменчивости наблюдаемой случайной величины, вычисляют по формуле:

$$\nu = \bar{S} / \bar{x} \quad (15)$$

Коэффициент вариации может быть вычислен и в %:

$$\nu = \frac{\bar{S}}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (16)$$

6. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В таблицах 12-14 и рисунках 35-37 представлены результаты экспериментального исследования звукоизлучения биметаллов.

Если сравнить уровни звука после соударения образцов биметаллов с ударниками диаметрами 8мм, 12мм и 15 мм, то видно, что у монообразца МС уровни звука изменяются последовательно: 65,1 дБА ($d=8\text{мм}$); 71,1 дБА ($d=12\text{мм}$); 82,3 дБА ($d=15\text{мм}$). Здесь отсутствует эффект амплитудно зависимого демпфирования звукоизлучения (АЗДЗ) то же наблюдается у образца БМ50: 67,8 дБА ($d=8\text{мм}$); 80,4 дБА ($d=12\text{мм}$); 81,4 дБА ($d=15\text{мм}$). Здесь также отсутствует эффект АЗДЗ

Образец ГЕБМ-1 характеризуется звукоизлучением после соударения ударниками: 72,8 дБА ($d=8\text{мм}$); 77,1 дБА ($d=12\text{мм}$); 74,8 дБА ($d=15\text{мм}$). Здесь обнаруживается АЗДЗ при соударении ударником $d=15\text{мм}$, т.к. при этом соударении генерируется звук 74,8 дБА, меньше по уровню, чем при соударении ударником $d=12\text{мм}$ (77,2 дБА). Амплитудно зависимое демпфирование заключается в том, что с увеличением амплитуды удара диссипация растет, уровень звука падает. Этот эффект впервые установлен в 2003г профессорами Сулеевым Д.К. и Утеповым Е.Б. и назван авторами эффектом Сулеева-Утепова. Этот эффект наблюдается при соударениях образцов ГЕБМ-3, ГЕБМ-4.

Анализ частотного спектра уровней звукового давления при соударении образцов с ударником $d=15\text{мм}$ (табл. 45) показывает, что максимум УЗД наблюдаются на частотах 16000 Гц (76-82 дБ); минимумы на частотах 31,5 Гц (57-63 дБ); 63 Гц (50-56 дБ); 125Гц (54-62дБ)⁷

Анализ октавных частот УЗД при соударении образцов с ударником 12 мм (таблица 14) показал, что максимумы УЗД наблюдаются на частотах 16000 Гц (58-79 дБ); 8000 Гц (63-72 дБ). Минимумы октавных частотных УЗД наблюдаются у образцов на частотах 63 Гц (52-59 дБ); 125 Гц(50-63 дБ); 250 Гц (43-66 дБ).

Уровни звукового давления в октавных частотах при соударении образцов с ударником $d=8\text{мм}$ характеризуются макси-

мурами на частотах 16000 Гц (59-69 дБ); 8000 Гц (56-72 дБ). Минимальные УЗД наблюдаются на частотах 31,5 Гц (55-67 дБ) 63 Гц (47-58 дБ); 125 Гц (48-64 дБ).

Анализ УЗД в третьоктавных полосах частот при соударении ударником $d=8\text{мм}$ показал следующее: максимумы УЗД наблюдаются на частотах 10000 Гц (69 дБ), 16000 Гц (67 дБ), 500 Гц (68 дБ), 315 Гц (64 дБ). Минимальные УЗД наблюдаются на частотах 40 Гц (43 дБ); 80 Гц (49 дБ); 125 (43 дБ); 250 Гц (44 дБ); 31,5 Гц (41 дБ); 400 Гц (42 дБ); 500 Гц (40 дБ); 800 Гц (38 дБ); 1000 Гц (35 дБ).

Анализ УЗД в третьоктавных полосах частот при соударении ударником $d=12\text{мм}$ показал следующее. Максимумы УЗД наблюдаются на частотах 125000 Гц (79,5 дБ); 16000 Гц (70,8 дБ); 10000 Гц (70,2 дБ); 5000 Гц (69,3 дБ). Минимальные УЗД наблюдается на частотах 50 Гц (42,8 дБ); 800 Гц (44,4 дБ); 1000 Гц (43,9 дБ).

Анализ УЗД в третьоктавных полосах частот при соударении ударником $d=15\text{ мм}$ показал следующее: максимумы УЗД наблюдаются на частотах 12500 Гц (80,4 дБ); 16000 Гц (76,4 дБ); 10000 Гц (69,5 дБ); 8000 Гц (70,6 дБ).

Таблица 12

Уровни звукового давления сплавов и биметаллов (d=15мм)

Марка образца	УЗД, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц										L _A , дБА
	31,1	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	
МС	61	54,3	62,1	65,07	69,97	58,8	60,63	66,07	72,33	82,63	82,3
БМ50	60,8	54,4	57,5	59,43	68,87	61,87	67,63	74,53	78,8	80,93	81,4
ГЕБМ-1 (С)	60,7	56,07	56,17	59,2	61,73	54,53	60,77	65,83	68,87	74,77	74,8
ГЕБМ-1 (А)	59,77	52,6	62,07	71,53	75,77	63,33	64,57	66,47	72,83	76,5	76,8
ГЕБМ-2 (С)	63,2	54,07	57,1	60,53	60	53,43	61,97	65,93	69,73	76,17	76,9
ГЕБМ-2 (А)	61,2	50,73	56,1	62,5	66,97	53,9	60,13	68,1	69,47	77,43	78,4
ГЕБМ-3 (Т)	60,4	54,73	61,27	66,5	70,2	63,93	61,67	66,1	72,27	77,43	78,3
ГЕБМ-4 (НТ)	57,6	52,23	54,1	60,4	68,4	61,1	60,87	63,27	66,13	77,17	78,6
ГЕБМ-5	63,4	52,3	61,37	72,07	78,3	69,03	66,37	66,57	67,2	82,03	82,5

Таблица 13

Уровни звукового давления сплавов и биметаллов (d=8мм)

Марка образца	УЗД, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц										L _A , дБА
	31,1	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	
МС	59,53	51,47	58,13	60,27	62,17	54,4	55,57	40,03	62,33	64,63	65,1
БМ50	60,07	50,9	64,3	70,77	77,5	65,7	58,9	53,13	65,2	64,07	67,8
ГЕБМ-1 (С)	61,6	54,9	60,4	66,4	63,2	59,87	55,73	56,13	72,07	69,93	72,8
ГЕБМ-1 (А)	67,47	58,37	56,57	56,83	55,17	49,1	49,57	52,63	60,6	65,4	65,4
ГЕБМ-2 (С)	56,53	52,63	61,9	64,13	68,4	59,57	49,03	50,4	56,47	59	60,1
ГЕБМ-2 (А)	61,1	57,13	52,5	58,43	60,37	53,23	52,87	55,97	61,57	64,07	64,9
ГЕБМ-3 (Т)	58,4	51,9	59,4	63,47	62,47	49,2	47,5	54,03	58,43	62,73	62,7
ГЕБМ-4 (НТ)	61,43	53,1	59	61,07	61,97	45,87	51,27	57,07	65	62,07	66,1
ГЕБМ-5	55,6	47,9	48,03	33,13	43,73	40,97	47,8	56,63	64,67	67,5	67,9

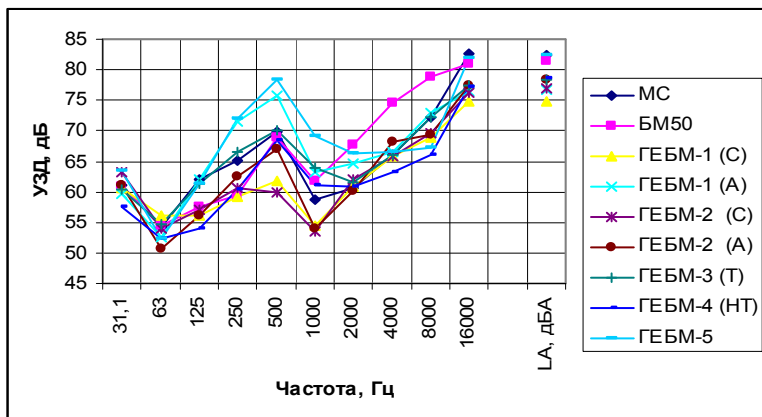


Рис. 64. Уровни звукового давления исследованных сплавов и биметаллов ($d=15\text{мм}$)

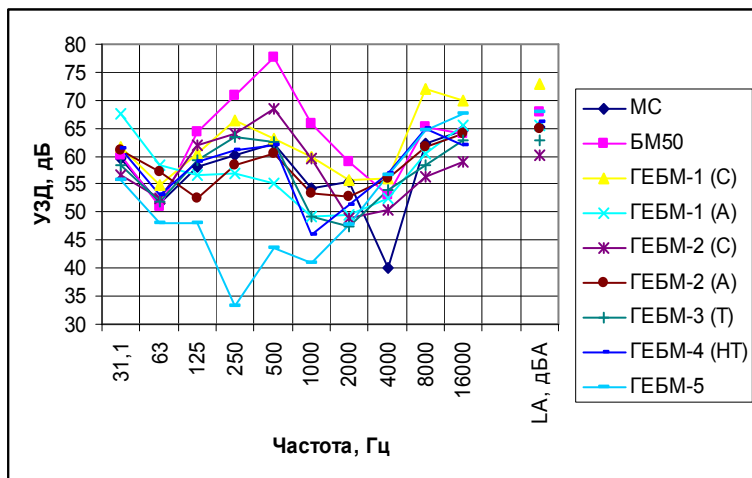


Рис. 65. Уровни звукового давления исследованных сплавов и биметаллов ($d=8\text{мм}$)

Таблица 14

Уровни звукового давления сплавов и биметаллов (d=12мм)

Марка образца	УЗД, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц										L _A , дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	
МС	61,7	53,6	59,37	64,67	68,1	57,2	59,67	64,67	70,07	58,27	71,1
БМ50	59,6	59,47	57,67	60,3	58,63	52,47	62,23	67,07	72,73	79,93	80,4
ГЕБМ-1(С)	67,2	60,27	54,47	56,3	59,43	55,87	60,5	65,27	67,33	76,73	77,1
ГЕБМ-1 (А)	57,4	57,07	63,87	43,3	70,8	62	64,03	72,1	72,2	76,73	77,2
ГЕБМ-2 (С)	61,07	58,9	62,03	66,3	73,8	58,2	58,93	63,43	63,8	66,7	66,5
ГЕБМ-2 (А)	61,77	53,1	57,23	60,47	66,63	62,17	59,6	61,13	62,8	71,43	71,8
ГЕБМ-3(Т)	57,3	54,27	50,47	53,1	51,17	50,53	60,47	64,63	72,7	78,4	79
ГЕБМ-4 (НТ)	62,63	55,87	61,77	63,93	64,1	55,93	60,1	63,7	71,03	79,13	79
ГЕБМ-5	56,73	52,87	54,9	65,03	65,4	49,23	53,47	56,37	66,9	75,1	75

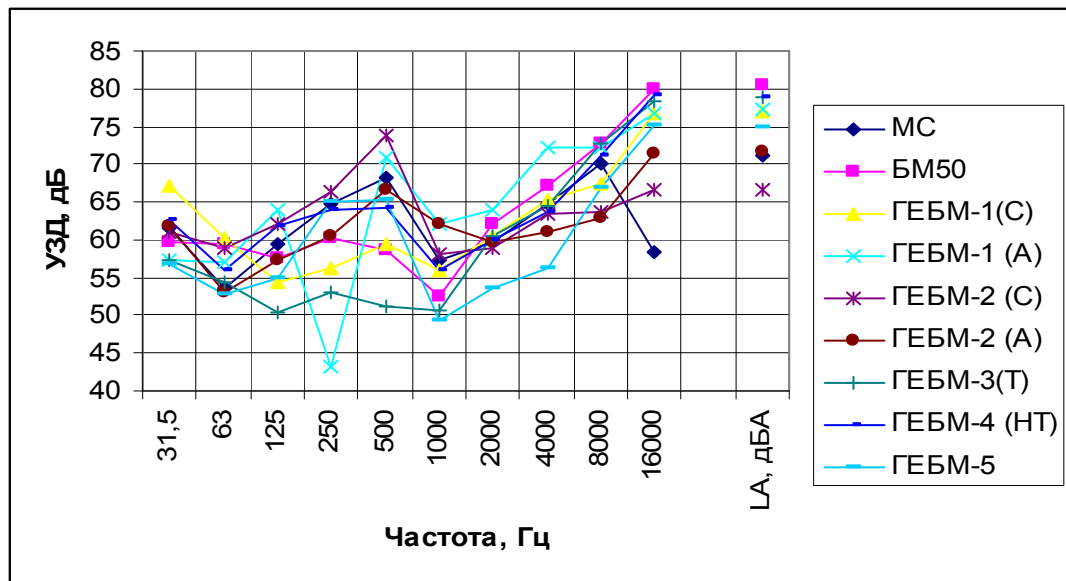


Рис. 66. Уровни звукового давления исследованных сплавов и биметаллов ($d=12\text{мм}$)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии решены следующие задачи:

1. Дана характеристика биметаллическим материалам (коррозионностойкие, проводниковые, контактные, термобиметаллы и др.).
2. Определены основные преимущества биметаллов перед монометаллами.
3. Представлены методы получения биметаллов (литьем, склеиванием, прокаткой, взрывом, клепкой).
4. Дана характеристика демпфирующим сплавам, используемым в технике борьбы с шумом и вибрацией.
5. Разработаны демпфирующие сплавы, характеризующиеся повышенными демпфирующими свойствами при соударениях.
6. Получены экспериментальные образцы биметаллов (сталь-сталь, сталь-алюминий) методом склеивания.
7. Исследованы акустические, демпфирующие и физико-механические свойства биметаллических материалов ГЕБМ-1, ГЕБМ-2, ГЕБМ-3, ГЕБМ-4, ГЕБМ-5.
8. В биметаллических материалах ГЕБМ-1, ГЕБМ-4 обнаружено амплитудно-зависимое демпфирование звукоизлучения.
9. Осуществлена опытно-промышленная проверка результатов исследования, подтвердившая повышенные демпфирующие свойства биметаллического материала ГЕБМ-1 (снижение шума составило 4-8 дБА).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Голованенко С.А., Меандров Л.В. Производство биметаллов М., Металлургия, 1966. – 303 с.
2. Туфанов Д.Г. Коррозионная стойкость нержавеющих сталей, Справочник, изд. «Металлургия», 1964.
3. Дятлова В.Н. Коррозионная стойкость металлов и сплавов, Справочник, изд. «Машиностроение», 1963.
4. Голованенко С.А. и др. Прессование биметаллических профилей, Кузнечно-штамповочное производство, 1963, № 10.
5. Громов Н.П. и др. Новые термобиметаллы. Вестник электропромышленности, 1956, № 8.
6. Лифшиц Е.М. Теория молекулярных сил притяжения между твердыми телами, ЖТФ, г. 29, вып. 1, 1955.
7. Whitehead I.R. Proc. of the Royal Society, vol. 201, 1950, p. 109
8. Айнбиндер С.Б. и Клокова Э.Ф. Некоторые вопросы теории сцепления металлов при совместной пластической деформации, Изв. АН Латв. ССР, 1958, № 12.
9. Айнбиндер С.Б. и Клокова Э.Ф. О возникновении сцепления металлов при совместной пластической деформации, ЖТФ, т. XXV, вып. 13, 1955.
10. Семенов А. П. Схватывание металлов, Машгиз, 1958.
11. Баранов И. Б. Холодная сварка пластичных металлов, Машгиз, 1962.
12. Сахацкий Г.П. О принципиальных основах холодной сварки металлов. Автоматическая сварка, 1959, № 7.
13. Pags I. M. RekrySTALLIZATION Welding, The Welding Journal, vol. 32, 1953, N 5.
14. Лашко Н.Ф., Лашко-Авакян С.В. Металловедение сварки, Машгиз, 1954.
15. Айнбиндер С.Б. Холодная сварка металлов, изд. АН Латв. ССР, 1957.
16. Астров Е.И. О схватывании металлов при совместном пластическом деформировании, Сб. ПТНИИ Горьк. СНХ, вып. 2 (4), Горький, 1960.

17. *Tylecote R.F.* Summary of results on similar metal welds, *British welding journal*, vol. 1, 1954, N 3.
18. *Sowter A. B.* *Materials and Methods*, 28, 1948, pp. 60–63.
19. *Астров Е.И.* Физико-химические основы процесса схватывания при производстве плакированных металлов. Производство и применение биметаллов и металлов с защитными покрытиями (по материалам научно-технической конференции), Инф. ЦНИИ ЧМ, 1962.
20. *Бельченко Г.И., Баранов А.А.* Влияние некоторых элементов на схватывание стали при горячей деформации. Известия вузов, Черная металлургия, 1963, № 1.
21. *Зильберг Ю.Я., Бакума С.Ф.* Производство катаных биметаллических полос. Бюлл. ЦИИН ЧМ, 1957, № 9.
22. *Бояришинов М.И. и Заморцева И.Н.* Влияние различных факторов на сцепление меди со сталью в твердом состоянии, Сб. научных трудов МГМИ, вып. 11, Магнитогорск, 1957.
23. Производство и применение биметаллов и листов с защитными покрытиями (по материалам научно-технической конференции), Инф. ЦНИИ ЧМ, 1962, стр. 35.
24. *Павлов Иг. М. и Бринза В.Н.* Исследование деформации биметалла титан–сталь при прокатке, Цветные металлы, 1961, № 11.
25. *Айбиндер С.Б., Семенова Г.А.* Исследование зоны сцепления при сварке металлов, Физика металлов и металловедение, т. 14, вып. 1, 1962.
26. *Аркулис Г.Э.* К теории совместной пластической деформации разнородных металлов, Известия вузов. Черная металлургия, 1960, № 1.
27. *Frautin J.* и др. Aspecte tehnice-economice a le fabricarii si utilizarii lamelor de otel placat, *Metallurgia*, 1963, 15, N 4.
28. *Вейнгартен А. М.* и др. Судостроительная сталь, Судпромгиз, 1962.
29. *Гильденгорн М.С.* Опыт получения труб из сплава Д16 с двусторонней плакировкой алюминием, Известия вузов, Цветная металлургия, 1964, № 2.
30. *Громов Н.П.* и др. Новые термобиметаллы. Вестник электропромышленности, 1956, № 8.

31. *Лагунов Л.Ф., Осипов Г.Л.* Борьба с шумом в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1980. – 150 с. ил.

32. Справочник по контролю промышленных шумов: Пер. с англ. /Пер. Л.Б. Скарина, Н.И. Шабанова. Под ред. д.т.н., проф. В.В. Ключева. – Машиностроение, 1979. – 447 с.

33. *Бекишин Б.С., Ноздрин М.А.* Исследование оптимального расположения оборудования на перекрытии с целью уменьшения вибрации и шума. – В сб.: проблемы инженерной охраны труда. Науч. тр. Моск. ин-та стали и сплавов. №105. – М.: Металлургия, 1977. – 75-78 с.

34. *Фавстов Ю.К., Шульга Ю.Н., Раштадт А.Г.* Металловедение высокодемпфирующих сплавов. – М.: Металлургия, 1980. – 272 с., ил.

35. Справочник по технической акустике: Пер. с нем. /Под ред. М. Хекла и Х.А. Мюллера. – Л.: Судостроение, 1980. – 440 с., ил.

36. *Schetky L.M., Perkins J.* The “Quiet” Alloys – “Maschine Desigh”, 1978, Vol.50, No.8, p. 202-206

37. *Накаэ Хидэо, Одзаки Тосинори* «Киндзоку, Kindzoku», 1979, №8, 35-38 с.

38. *Бринза В.Н., Белов А.В.* Исследование звукоизлучения композиционных материалов. – В сб.: Проблемы инженерной охраны труда. Науч. тр. Моск ин-та стали и сплавов, №105. – М.: Металлургия, 1977. – 58-69 с.

39. *Бринза В.Н., Белов А.В.* О механизме демпфирования звуковых колебаний в металлических композиционных материалах. – В сб.: Проблемы инженерной охраны труда. Науч. тр. Моск ин-та стали и сплавов, №127. – М.: Металлургия, 1981. – 84-88 с.

40. *Японт.* Патент №54-15245 /Отани Тосикану. – Опул. 13 июня 1979, кл. 10Н4 (С 22 С 22/00).

41. *Такахара Хидефуса* «Намари то ээн», 1979, 16, №3, 8-19 с.

42. *Фавстов Ю.К., Шульга Ю.Н.* Сплавы с высокодемпфирующими свойствами. – М.: Металлургия, 1973. – 255 с., ил.

43. *Наумкина Н.И., Тартаковский Б.Д.* Исследования внутренних потерь сплава марганца с медью. – В сб.: Колебания, излучения и демпфирование упругих структур. – М.: Наука, 1973. – 278 с., ил.

44. Mc. Crary L.E. Uber das Dampfungsverhalten einiger Kupfer-Mangan-Leqierungen. Metall, 1962, 16, No.11, S. 1074-1077.

45. Рахмитадт А.Г., Фавстов Ю.К., Кочеткова Л.Н. Структурные превращения в маргонцевомедных сплавах с высокой демпфирующей способностью. - Металловед. и терм. обработка металлов, 1973, №2 – 19-23 с.

46. Vonkateswararo P., Chatterijee D.K. Structural studies on the alloying behavior of γ - Mn and the development of a high damping capacity in Mn-Cu alloys. "J. Mater. Sci.", 1980, 15.

47. Япон. заявка №54-85115/Масумото Хакару, Саватани Акихати. – Оpubл. в Дзайдан хокзин денки дзики дзайрё кэнкю-се 6 июля 1979, кл. 10 172 (С 22 С 38/30).

48. High damping characteristics of Fe-Cr-Al alloys associated with their magnetic properties. Amano K., Sahashi M., Tokoro H., Nakagava M. Intern. Frict. and Ultrasonic Attenuat. Solias. Proc. 6-th Int. Conf., Tokyo, 1977, 763-767.

49. Утепов Е.Б., Утепов Т.Е., Айсаутова С.Ж. и др. Математическое моделирование вибрации металлической пластины при соударении / Безопасность жизнедеятельности. Борьба с шумом. Демпфирующие материалы и конструкции для снижения шума и вибрации // Сборник научных публикаций. Под редакций д.т.н., проф. Е.Б. Утепов - Алматы: НИЦ «Ғылым», 2001. – Вып. 1. – 5 с.

50. Япон. заявка №54-102216 /Масумото Хакару, Саватани Акихати. – Оpubл. в Дзайдан хокзин денки дзики дзайрё кэнкю-се 6 сентября 1978, кл. 10j174 (С 22 С 38/52).

51. Магнитные свойства металлов и сплавов / Семинар по магнитным свойствам металлов и сплавов Кливленд, 25-26 октября 1958г. Пер. Л.А. Щубиной, Под ред. С.В. Вонсовского – М.: Изд. иностран. лит-ры, 1961 – 446 с.

52. Patent №416427 (USA). Heat treatment of titanium alloys. Ueda Shoji, Daikoku Takashi, Takeda Yorimasa, Hiromoto Akira and others. Mitsubishi jukegyo k.k.

53. Marimoto Syogo, Shimaguchi Takashi "Huxon orke rakkau cu. – J. Acoustical Soc. Jap." – 1980, 36, No.8, 419-422

54. Бодяко М.Н., Гордиенко А.И., Мещеряков В.Н. Влияние структуры и фазового состава на скорость звука в титановом сплаве ВТ 8. – Докл. АН БССР, 1978, 22, №10, С. 986-900

55. Шостак А.Г. Борьба с промышленным шумом. - Киев: УкрНИИНТИ, 1972. - 121 с.

56. Литейное производство – 1965, №9 – С. 7-9

57. Циклическая вязкость чугуна. Распределения и магния в чугуне / Отв. ред. д.т.н. М.В. Волощенко – Киев, Наука думка, 1973 – 168 с., ил.

58. Исследование демпфирующей способности чугуна с различной формой графитных включений / С.А. Головин, В.А. Кузьменко, Г.Д. Петрушин, М.Н. Письменный и др. – Проблемы прочности, 1980, №3 – С. 91-94

59. Муравьев В.А. Затухание звуковых колебаний металлов - М.: Металловед. и терм. об-ка металлов, 1975, №4 – С. 63-64

60. Matsukura Takashi, Tsuiji Norio, Namunaka Seiich “нисан с сэйко тихо” Nissan Steel Techn. Repr, 1979, №40, pp. 15-20

61. Пивоваровский Е. Высококачественный чугун. В 2-х т. – М.: Металлургия, 1963 – 1184 с.

62. Гуляев А.П. Металловедение – М.: Металлургия, 1977 – 648 с.

63. Оценка свойств графитизированных сталей при повышенных температурах /А.Я. Храпов, Ф.И. Ардовский, С.А. Дубровский, С.П. Паринов – Изв. ВУЗов. Черная металлургия, 1976, №6, С. 130-132

64. Скворцов А.И., Кондратов В.М. Демпфирующие свойства графитизированных сталей с ферритной и ферритно-карбидной матрицей - М.: Металловед. и терм. об-ка металлов, 1980, №8 – С. 45-48

65. Сулеев Д.К. Влияние термической обработки на диссипативные свойства исследованных сплавов / Безопасность жизнедеятельности. Борьба с шумом. Демпфирующие материалы и конструкции для снижения шума и вибрации // Сборник научных публикаций. Под редакций д.т.н., проф. Е.Б. Утепов - Алматы: НИЦ «Ғылым», 2001. – Вып. 1. – 9 с.

66. Москалева Л.Н., Працюк В.А. Исследование акустических свойств сталей, легированных титаном. - В сб.: Проблемы

инженерной охраны труда. Науч. тр. Моск. ин-та стали и сплавов, № 127. -М.: Металлургия, 1981, С. 69-75.

67. *Gessinger Gernot H., Corti christofer W., Cooper Paul D.* Dampfung von Hochtemperaturwerkstoffen, "Z.metallik", 1979, 70, №3, 135-141

68. Studies of steel microstructure by acoustical methods / Grayeli N., Ilic D.B., Strance F. Chou C.H. and others Ultrason Symp. Proc. New Orleans, La, 1979, New York, N.Y., 1979, 273-277

69. *Утепов Е.Б., Сулеев Д.К., Бижанов Н.К.* и др. Научные основы создания «тихих» сплавов (проблемы акустической экологии) - Алматы: ТОО «Принт», 2000. – 332 с.

70. *Утепов Е.Б., Актаев Б.Г., Хохлов П.П., Утепов Б.Б.* Разработка малошумных сплавов 2-е изд. - Алматы, ТОО «Принт», 2000 г. – 114 с.

71. *Утепов Т.Е., Утепов Е.Б.* Исследования вибрационных свойств сталей. // Материалы V Международной научно-технической конференции «Новое в охране труда, окружающей среде и чрезвычайных ситуациях», Алматы, 1-2 ноября 2002.- С.310.

72. Патент № DE 19937462 A1 (Германия) 7G 10K 11/168 Шумопоглощающее и шумоизолирующее покрытие для детали, склонной к вибрации / Heescher A., Mueller R. – Оpubл. в Изобретения стран мира, 2002, Вып. 97, № 2 – С. 3

73. Патент № DE 19952689 A1 (Германия) 7G 10K 11/168 Звукопоглощающие стенка и ее применение / Diedrichs H., Dopheide R., Bildner K. - Оpubл. в Изобретения стран мира, 2002, Вып. 97, № 5 – С. 3

74. Патент № DE 19955873 A1 (Германия) 7G 10K 11/168 Многослойный звукопоглощающий элемент / Dopheide R., Siering H. - Оpubл. в Изобретения стран мира, 2002, Вып. 97, № 5 – С. 3

75. *Сулеев Д.К.* Вибродемпфирующие сплавы в технике борьбы с шумом. – Алматы: НИЦ «Гылым», 2002. – 301 с.

76. *Сулеев Д.К., Утепов Е.Б.* Применение метода математического планирования эксперимента при разработке сталей и сплавов с повышенными демпфирующими свойствами / Безо-

пасность жизнедеятельности. Борьба с шумом. Демпфирующие материалы и конструкции для снижения шума и вибрации // Сборник научных публикаций. Под редакций д.т.н., проф. Е.Б. Утепов - Алматы: НИЦ «Ғылым», 2001. – Вып. 1. – 14 с.

77. *Утепов Е.Б., Серикбаев М.А.* и др. Расчет собственных частот прямоугольной стальной пластины / Безопасность жизнедеятельности. Борьба с шумом. Демпфирующие материалы и конструкции для снижения шума и вибрации // Сборник научных публикаций. Под редакций д.т.н., проф. Е.Б. Утепов - Алматы: НИЦ «Ғылым», 2001. – Вып. 1. – 21 с.

78. *Чернашкин В.Г., Радаева В.М.* Демпфирующая способность строительных сталей повышенной и высокой прочности - М.: Металловед. и терм. об-ка металлов, 1976, №1 – С. 43-46

79. *Москалева Л.Н., Парфенов А.А.* К анализу комплексного исследования свойств железокремнистой стали - В сб.: Проблемы инженерной охраны труда. Науч. тр. Моск. ин-та стали и сплавов, № 127. -М.: Металлургия, 1981, С. 80-83

80. *Криштал М.А., Пигузов Ю.В., Головин С.А.* Внутреннее трение в металлах и сплавах – М.: Издательство «Металлургия», 1964. – 245 с.

81. *Павлов Б.В.* Вопросы диагностики обслуживания машин – Новосибирск: Машиностроение, 1968

82. Акустические свойства стальной проволоки / А.П. Гуляев, Л.Ш. Писаревский, Б.Я. Гурина, В.М. Бунеева - М.: Металловед. и терм. об-ка металлов, 1972, №3 – С. 64-65

83. *Злобинский Б.М., Муравьев В.А.* Звукоизлучение металлов – М.: Металловед. и терм. об-ка металлов, 1974, №1 – С. 56-57

84. *Савицкий Е.М., Терехов В.Ф.* Металловедение редкоземельных металлов – М.: Наука, 1975 – 260 с.

85. *Криштал М.А.* Взаимодействие между дислокациями и атомами примесей в металлах и сплавах – Тула: Тульский политехнический институт, 1969. – 314 с.

86. Прокатка металлов в вакууме и инертной среде. Труды Укр. НИИ металлов. Техника, Киев 1964, с. 33-42

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	3
1	Свойства биметаллов	6
1.1	Коррозионностойкие биметаллы	6
1.2	Антифрикционные биметаллы	10
1.3	Инструментальные и самозатачивающие биметаллы	11
1.4	Проводниковые и контактные биметаллы	13
1.5	Термобиметаллы	14
1.6	Сравнение биметаллов по сравнению с однородными металлами	14
2	Теория и практика изготовления биметаллов	16
2.1	Теория сцепления металлов	16
2.2	Практические результаты сцепления биметаллов....	21
2.3	Изучение контактной зоны биметалла	29
2.4	Изучение пластических свойств биметаллов	29
3	Методы получения биметаллов	31
3.1	Изготовление биметаллов литьем заливкой	31
3.2	Изготовление биметаллов пластическим деформированием	42
4	Демпфирующие сплавы в технике борьбы с шумом.....	43
4.1	Использование демпфирующих сплавов в технике борьбы с шумом	43
5	Методика исследования биметаллов	78
5.1	Материал для исследования.....	78
5.2	Исследование акустических свойств металлических материалов	81
5.3	Измерение демпфирующих характеристик	83
5.4	Стандартные методы исследования	84
5.5	Изготовление биметаллических образцов	85
5.6	Обработка экспериментальных результатов	86
6	Результаты экспериментальных исследований.....	88
	Заключение	95
	Список использованных источников	96

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ
ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ШУМА СОУДАРЕНИЙ В УЗЛАХ
МАШИН И МЕХАНИЗМОВ**

Сулеев Досым Касымович
Утепов Еркасын Балапанович
Утепов Тимур Еркасынович
Утепова Галия Еркасыновна
Сыдыкова Арай Багдатовна

Под научной редакцией академика МАНЭБ,
доктора технических наук, профессора Утепова Е.Б.

Редактор	<i>Утепов Е. Б.</i>
Технический редактор	<i>Утепов Т.Е.</i>
Корректор	<i>Курманалиева А.Р.</i>
Компьютерный набор и верстка	<i>Оразалиева А.Н.</i>

Подписано в печать 14.01.2008 г.

Формат 60x84. Бумага типографская. № 1.
Объем 7,0. уч. изд. л. Тираж 500 экз. Заказ № 161.

Отпечатано в Научно-техническом издательском центре
КазНТУ имени К. И. Сатпаева
г. Алматы, ул. Ладыгина, 32.