

***А. Н. Тұрсынбаева¹, М. Е. Исаметова²,
А. М. Дүйсенәли³, Е. С. Ильясов⁴**

^{1,2,3,4}Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0249-4991>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4630-271X>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9476-237X>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2375-2617>

*e-mail: nurtassovna.iqo@mail.ru

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА 3D ПЕЧАТИ МАТРИЦЫ ДЛЯ ГИБКИ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА КОМПОЗИТНЫМИ ГРАНУЛАМИ

В статье рассматривается применение аддитивных технологий в производстве оснастки из полимеркомпозитных материалов, приведены особенности технологического процесса Fused Granular Fabrication (FGF). Представлен процесс создания матрицы для гибки V-образным пазом под углом 90° из композитного материала, на основе полимерной матрицы с добавлением стекловолокна для повышения износостойкости.

В процессе технологического процесса с использованием композитной матрицы были выявлены тот факт, что пружинение заготовок практически минимально. В статье приведены результаты сравнения параметров обработки материала на стальной и композиционной полимерной матрицах. По результатам экспериментов очевидно, что для обработки материала с относительно большим внутренним радиусом предпочтительнее использовать полимерную матрицу, поскольку это позволяет снизить усилие давления на 10–20 % при получении одинакового качества продукции.

Экспериментальные результаты показывают, что использование композиционных полимерных матриц для гибки в мелкосерийном производстве позволяет уменьшить усилие давления, а также снизить стоимость производства по сравнению с традиционными металлическими инструментами. В заключении выделяются преимущества и ограничения применения таких матриц, а также рекомендации для оптимизации процесса гибки и дальнейшего использования в промышленности.

Ключевые слова: аддитивные технологии, технология FGF, полимерные материалы, композитные материалы, гибка, V-образный паз, матрица.

Введение

Полимерные и полимер-композитные материалы (ПКМ) все больше находят своё применение в машиностроении благодаря их уникальным свойствам, таким как высокая прочность, малая масса, коррозионная стойкость и возможность адаптации под конкретные задачи. Основные области применения ПКМ в изготовлении

деталей машиностроения: легкие и прочные корпуса для оборудования, таких как насосы, компрессоры и другие агрегаты. Производство деталей кузова, шасси, пружин, панелей дверей и других компонентов. Это уменьшает вес автомобиля, что приводит к экономии топлива. Наряду с традиционными методами производства полимерных деталей таких как литье под давлением, экструзия появились новые возможности производства после разработки и внедрения 3D-оборудования и в машиностроительной отрасли. Исследования в области применения и совершенствования технологии производства полимерных изделий для машиностроения является актуальной и многогранной темой, которая включает в себя множество аспектов. Совершенствование технологии производства полимерных изделий для машиностроения — это не просто путь к повышению качества продукции, но и ключ к решению современных вызовов, связанных с экономичностью, экологичностью и технологической конкурентоспособностью. Это направление позволяет удовлетворить растущие требования отрасли, обеспечивая устойчивое развитие машиностроения и его интеграцию в глобальные производственные цепочки. В ранее проведенных исследованиях были рассмотрены параметры технологических процессов изготовления деталей из полимер-наполненных композитов. Основной целью данных исследований являлась замена традиционных металлических деталей на полимерные и полимеркомпозитные аналоги, обладающие улучшенными характеристиками, такими как меньший вес, повышенная коррозионная стойкость и возможность адаптации под сложные конструктивные формы [1, с.112-119;3, с.142-149]. Авторы статьи [4, с.2383-4536] приводят результаты вычислительных и натурных экспериментов технологического процесса литья под давлением композита из карбонатной матрицы наполненной стекловолокном для замены рабочего колеса центробежного многоступенчатого насоса из металла на композитное колесо.

В работе [5, с.1694;7] в контексте обработки металлов давлением была предложена быстрая оснастка для вытяжки, изготавливаемая аддитивным производством. Исследователи привели целенаправленное механическое описание материалов, изготовленных с использованием добавок (АМ). Результаты этих исследований иллюстрирует целесообразность такого применения и показывает диапазон производственных возможностей, качество достижимое при использовании композитных материалов и пользовательских настроек для 3D-печати.

В статье [8, с.1671–1676;10, с.156–160] исследуется применение функциональных элементов, изготовленных с использованием полимера и добавок, в инструментах для глубокой вытяжки. Помимо первой концепции таких инструментов, описаны и проанализированы первые серии экспериментальных испытаний.

В [11, 412-422 с.;12] рассматривают последние разработки в области технологий изготовления оснастки и анализируют потенциальные преимущества, вытекающие из этой разработки, в отношении качества. Новая технологии

изготовления оснастки LOM (Laminated Object Manufacturing) с ламинированием для мелкосерийного производства решает проблему профилирования краев матрицы для гибки.

Не умоляя значимости приведенных исследований и отмечая все достоинства технологии FGF склонаполненными полимерными гранулами, которые будут приведены ниже, нужно отметить, что этому способу производства гибочной оснастки уделено не достаточное внимание исследователей. В этой статье мы отразили результаты создания матрицы для гибки листового металла технологическим процессом FGF печати из полимеркомпозитного гранулированного материала.

Объект исследования

Объектом исследования в данной статье это процесс производства технологий Fused Granular Fabrication (FGF) матрицы для гибки V-образным пазом под углом 90° (рисунок 1) из Листовая штамповка в современном производстве является одним из самых распространенных и высокоскоростных операций в машиностроительном производстве.

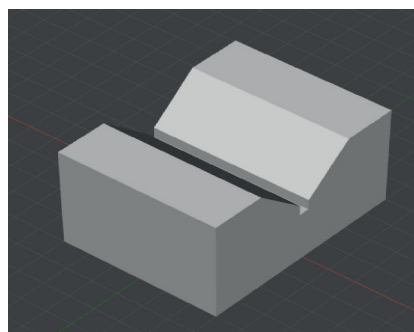


Рисунок 1 – 3D модель матрицы для гибки листового металла

Точность получения тонколистовых деталей стабильных размеров делает данный вид обработки очень востребованным. Одним из существенных недостатков изготовления деталей подобным способом является высокая себестоимость.

Материалы и методы

Оборудования для производства гибочной оснастки.

Образцы матрицы печатались в лаборатории КазНИТУ имени К. И. Сатпаева на принтере 3D принтер PioCreat G5 (рисунок 5) печать по технологии FGF. Метод FGF как новый виток развития в экструзии полимеров Принцип передвижения экструдера в FGF 3D-принтере (рисунок 2) такой же, как и в традиционном FFF (Fused Filament Fabrication) принтере, однако расходным материалом вместо филамента являются композитные гранулы. Для переработки гранул используются дополнительные узлы, такие как бункер и шнековый экструдер. Шнек в экструдере осуществляет перемещение гранул от входного отверстия системы подачи к отверстию сопла. Непосредственно перед выдавливанием через сопло, расплавленный композит подвергается высокому давлению благодаря

двигателю, который вращает шнек. FGF-принтеры идеально подходят для печати функциональных средних и крупных объектов с толстыми стенками и не самой сложной геометрией.



Рисунок 2 – Принтер PioCreat G5

Материал Так как матрицы для гибки испытывают циклические контактные усилия, задачей исследования было подобрать более стойкий к истиранию материал. Гранулы (рисунок 3) - это первичное сырье для производства филамента. FGF-печать поддерживает большое разнообразие материалов, включая различные виды пластика, металла и композитов. Гранулы можно использовать в составе смесей для создания объектов с конкретными свойствами, повышенной гибкостью или прочностью. Для производство матрицы использовались гранулы композитного материала на основе полимерной матрицы и 10% включений рубленного стекла. Фото гранул приведены на рисунке 3.

Исключив один из технологических этапов производства расходного материала, мы получаем более низкую себестоимость изделия. Например, цена на 1 кг гранул TOTAL GF составляет менее 8000 тенге., тогда как 1 кг филамента аналогичного полимера обойдется примерно в 16000 тенге.



Рисунок 3 – Гранулы композита марки TOTAL GF 10 %

Технологический процесс

Листовой металл можно использовать для производства различных сложных трёхмерных плоских деталей, например, с помощью гибки и глубокого вытягивания. Некоторые преимущества такого процесса включают хорошие механические свойства полученных изделий, минимальное количество отходов и высокую производственную мощность. Одним из основных затратных факторов в процессе формирования листового металла является разработка и производство штамповочных инструментов. Обычно инструмент разрабатывается и изготавливается специализированным предприятием, что требует значительных временных затрат и может быть довольно дорогим. В процессе разработки инструмент может потребовать одной или нескольких корректировок, прежде чем достичь окончательной формы.

Процесс гибки можно классифицировать на три вида: ударная гибка, гибка с поддержкой снизу и гибка в воздухе. Устройство для гибки с использованием 3D-печати предназначено исключительно для гибки в воздухе, так как в этом процессе требуется минимальное количество опор.

Инструментальное оборудование для V-образной гибки было изготовлено с использованием технологии FGF, в частности, экструзии. Для гибки заготовок из поверхностного материала под углом 90° была создана матрица с V-образным углублением (рисунок 4), (длина — 80 мм; ширина — 60 мм; высота — 50 мм).

Параметры процесса печати были предварительно исследованы нами, результаты приведены в работах [9;12]. Учитывая результаты предшествующих исследований параметры печати:

Параметры печати матрицы:

1. Технология – Fused Granular Fabrication (FGF);
2. Оборудование – PioCreat G5;
3. Материал – Композитный материал TOTAL GF 10%;
4. Материал для поддерживающих структур – SR-30;
5. Толщина/высота слоя – 0,250 мм;
6. Заполнение внутреннего контура геометрии стенок – 100% (Solid);
7. Выбор наличия или отсутствия поддерживающих структур, только субстрат;
8. Температура нагрева экструдера – по умолчанию для композитного материала TOTAL GF 10%;
9. Допустимое отклонение линейных размеров, заявленное производителем – $\pm 0,089$ мм.



а) б) в)

Рисунок 4 – Матрица с V-образным углублением для гибки: а) 3D модель, созданная в программе КОМПАС; б) образец матрицы из стали; в) образец матрицы, напечатанный на 3D принтере из композиционного материала TOTAL GF 10%.

Матрица изготовлена из композитного материала TOTAL GF 10% с использованием технологии экструзии FGF. Деталь была размещена на рабочей платформе принтера горизонтально, что позволило сформировать V-образный вырез матрицы при наложении слоев. Такой подход предотвращает возникновение стратификации при воздействии силы в направлении, перпендикулярном V-образному вырезу, который состоит из разных слоев.

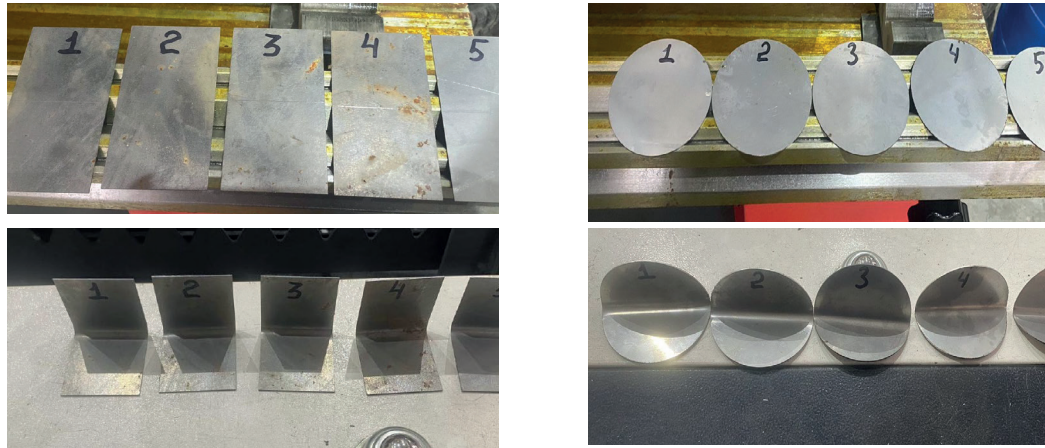
Гибка поверхностных материалов была выполнена на гибочном прессе марки ZWHOPES 63T2500 (с усилием 630 кН) в технопарке КазНУ имени К. И. Сатпаева (рисунок 5).



Рисунок 5 – Гибочный пресс

Результаты и обсуждение

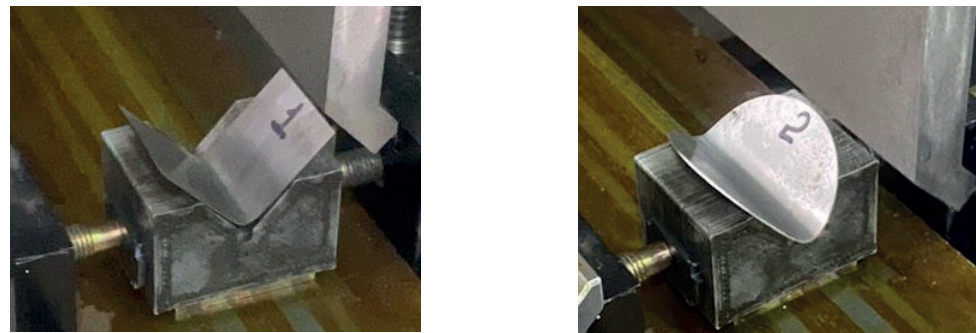
Тестирование образцов из стали 3 включало изгиб прямоугольных и круглых заготовок (рисунок 6-7). Первый образец имеет размеры 100x50 мм и толщину 0,8 мм, второй образец — диаметр 81 мм и толщину 1 мм. Всего было испытано 10 заготовок из стали 3.



а)

б)

Рисунок 6 – Заготовки из стали 3: а) Заготовка размером 100x50 мм, толщиной 0,8 мм до и после изгиба; б) Заготовка диаметром 81 мм, толщиной 1 мм до и после изгиба



а)

б)

Рисунок 7 – Процесс гибки заготовок из стали 3: а) Заготовка размером 100x50 мм, толщиной 0,8 мм; б) Заготовка диаметром 81 мм, толщиной 1 мм.

Матрица с V-образным углублением была изготовлена с учетом пружинного угла и принято, что он равен 860. После испытания двух различных образцов на гибку, заготовки были измерены с использованием оборудования для измерения углов, и результаты показали, что угол во всех заготовках составил 900 (рисунок 8). Этот результат подтверждает правильность проектирования матрицы.



а)

б)

Рисунок 8 – Измерение угла заготовок с использованием оборудования для измерения угла после гибки: а) Заготовка размером 100x50 мм, толщиной 0,8 мм; б) Заготовка диаметром 81 мм, толщиной 1 мм

На этой матрице была выполнена гибка нескольких партий деталей: первая партия не требовала точной геометрии и имела пружинение от 2 до 5 градусов в зависимости от толщины листа. Вторая партия была изготовлена с применением силы 100 кН для коррекции деталей.

При выполнении технологического процесса с использованием композитной матрицы были выявлено, что пружинение практически не наблюдается. В ходе экспериментов были сравнены параметры обработки материала на стальной и композиционной полимерной матрицах. Результаты экспериментов показали, что для обработки материала с относительно большим внутренним радиусом предпочтительнее использовать полимерную матрицу, поскольку это позволяет снизить усилие давления на 10-20% при получении одинакового качества продукции. Это снижение связано с разницей в жесткости полимерного и стального инструмента. Стальная матрица оказывает более жесткое сопротивление, что требует большего давления. Полимерная матрица имея меньшую жесткость чем сталь, частично деформируется, распределяя нагрузку более равномерно и снижает пик давления.

После проведения ряда экспериментов по гибке образцов с толщиной от 0,8 до 1 мм и коррекции внутреннего радиуса и гибочных полок, следы давления на боковых полках V-образного углубления инструмента не были обнаружены. Также не было зафиксировано первоначального износа всей области контакта образца с матрицей. Однако, несмотря на это, после нескольких гибок могут постепенно произойти изменения в размерах матрицы, что может повлиять на упругий угол изделия после последующей гибки.

Выводы

1 Возможность гибки материала до толщины 1 мм с использованием композиционной полимерной матрицы.

2 Благодаря более низкой жесткости материала матрицы, гибка может быть выполнена с меньшими усилиями по сравнению с металлической оснасткой.

3 Для гибки без коррекции детали форму инструмента можно значительно упростить, что позволит снизить стоимость материала и, соответственно, цену получаемого оборудования.

4 Из-за постепенного износа инструмента его следует использовать преимущественно в малосерийном производстве.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 **Smith, J.** Advanced Applications of Composite Materials in Aerospace // Journal of Materials Science. – 2023. – 58(3). – 112–119 p.
- 2 **Jones, L., & Johnson, P.** Composite Materials in Automotive Manufacturing // Automotive Engineering. – 2022. – 45(6). – 78–83 p.
- 3 **Lee, D., et al.** Applications of Carbon Fiber Reinforced Polymers in Modern Industries // International Journal of Advanced Materials. – 2021. – 33(5). – 142–149 p.
- 4 **Isametova, M., et al.** Computational and Experimental Study of the Composite Material for the Centrifugal Pump Impellers Manufacturing // Journal of Applied and Computational Mechanics. – January 2022. – 8(4). – 2383–4536 p.
- 5 **Frohn-Sörensen, P. et al.** Design for 3D Printed Tools: Mechanical Material Properties for Direct Polymer Additive Tooling // Polymers. – April 2022. – 14(9). – 1694 p.
- 6 **Jasinski, C. et al.** A new approach to experimental testing of sheet metal formability for automotive industry // Archives of Metallurgy and Metals. – 2019. – Vol. 64. p. – 1231–1238 p.
- 7 **Schell, T.** Basic investigations of a new Rapid Tooling technique for sheet metal forming (in German) // PhD thesis. University of Erlangen. – 2005.
- 8 **Leal, R. Barreiros, F. M., Alves, L., Romeiro, F., Vasco, J. C., Santos, M., Marto, C.** Additive Manufacturing Tooling for the Automotive Industry // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2017. – 92. – 1671–1676 p. [CrossRef].
- 9 **Schuh, G., Bergweiler, G., Bickendorf, P., Fiedler, F., Colag, C.** Sheet Metal Forming Using Additively Manufactured Polymer Tools. // Procedia CIRP. – 2020. – 93. – 20–25 p. [CrossRef].
- 10 **Schuh, G., Bergweiler, G., Fiedler, F., Bickendorf, P., Schumacher, P.** Small Series Production and Geometric Analysis of Sheet Metal Car Body Parts Using Forming Tools Made of Fused Filament Fabricated PLA // In Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Singapore. – 14–17 December 2020. – P. 156–160.
- 11 **Durgun, I.** Sheet Metal Forming using FDM Rapid Prototype Tool // Rapid Prototyping Journal. – 2015. – P. 412–422.
- 12 **Bergweiler, G. Fiedler, F. Kampker, A. Lichtenthäler, K.** Additively manufactured forming tools in prototype construction (in German) // Umformtechnik Blech Rohre Profile. – 2019.

Поступило в редакцию 22.01.25.

Поступило с исправлениями 29.01.25.

Принято в печать 12.02.2025.

***А. Н. Тұрсынбаева¹, М. Е. Исаметова²,**

А. М. Дүйсенғали³, Е. С. Ильясов⁴

^{1,2,3,4}Satbayev University, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

20.01.25 ж. баспаға түсті.

29.01.25 ж. түзетулерімен түсті.

12.02.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ҚАҢЫЛТЫР МЕТАЛДАРДЫ ИҮ ҚҰРАЛДАРЫН 3D БАСЫП ШЫҒАРУДЫҢ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ПРОЦЕСІН ӘЗІРЛЕУ

Мақалада полимер-композициялық материалдардан жасалған оснастканы өндіруде аддитивті технологияларды қолдану қарастырылған, сондай-ақ Fused Granular Fabrication (FGF) технологиялық процесінің ерекшеліктері келтірілген. Композиттік материалдан жасалған, шыны талшықтарын қосу арқылы тозуға төзімділікті арттыру мақсатында полимерлік матрица негізінде 90° бұрышта V-тәрізді пазаға арналған қалыпты жасау процесі ұсынылған.

Технологиялық процесс барысында композиттік матрица қолдану арқылы дайындамалардың серпімділігі дерлік минималды екені анықталды. Мақалада материалды өңдеудің параметрлерін болат және композициялық полимерлі матрицаларда салыстыру нәтижелері берілген. Эксперименттер нәтижесінде, салыстырмалы түрде үлкен ішкі радиусы бар материалдарды өңдеу үшін полимерлік матрица қолданудың тиімдірек екені айқындалды, себебі бұл өнімнің сапасын өзгеріссіз сақтай отырып, қысым күшін 10-20%-ға азайтуға мүмкіндік береді.

Эксперименттік нәтижелер композициялық полимерлік матрицаларды ұсақ сериялы өндірісте қолдану қысым күшін азайтуға және дәстүрлі металл құралдарымен салыстырғанда өндіріс құнын төмендетуге мүмкіндік беретінін көрсетеді. Қорытындыда мұндай матрицаларды қолданудың артықшылықтары мен шектеулері, сондай-ақ гибкалау процесін оңтайландыру және өнеркәсіпте әрі қарай қолдану үшін ұсыныстар жасалады.

Кілтті сөздер: аддитивті технологиялар, FGF технологиясы, полимерлік материалдар, композициялық материалдар, гибкелеу, V-тәрізді паза, матрица.

***А. N. Tursynbayeva¹, M. E. Isametova²,**

A. M. Duisengali³, Y. S. Ilyassov⁴

^{1,2,3,4}Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty

Received 20.01.25.

Received in revised form 29.01.25.

Accepted for publication 12.02.25.

DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF 3D PRINTING OF TOOLING FOR SHEET METAL BENDING

The article discusses the application of additive technologies in the production of tooling made from polymer composite materials, and presents the features of the Fused Granular Fabrication (FGF) technological process. It introduces the process of creating a matrix for bending a 90° V-shaped groove from a composite material based on a polymer matrix with the addition of fiberglass to improve wear resistance.

During the technological process using the composite matrix, it was found that the springback of the workpieces is practically minimal. The article presents the results of comparing material processing parameters on steel and composite polymer matrices. Based on the experimental results, it is evident that for processing material with a relatively large inner radius, it is preferable to use a polymer matrix, as it allows reducing the pressure force by 10–20 % while maintaining the same product quality.

Experimental results show that the use of composite polymer matrices for bending in small-scale production reduces the pressure force and lowers production costs compared to traditional metal tools. In conclusion, the advantages and limitations of using such matrices are highlighted, along with recommendations for optimizing the bending process and further industrial use.

Keywords: additive technologies, FGF technology, polymer materials, composite materials, bending, V-shaped groove, matrix.

МЕТАЛЛУРГИЯ

МРНТИ 53.03.09

<https://doi.org/10.48081/HVTA9346>

***А. А. Абілберікова¹, Д. А. Есенғалиев², Е. Қ. Қуатбай³,
Б. С. Келаманов⁴, К. Бензесик⁵**

^{1,3}Қарағандинский индустриальный университет,
Республика Казахстан, г. Темиртау

^{2,4}Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова,
Республика Казахстан, г. Актобе

⁵Стамбульский технический университет, Турция, г. Стамбул

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0133-3005>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0792-0822>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8400-3537>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7646-9153>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0996-5151>

*e-mail: abilberikova90@mail.ru

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛАТЕРИТНОЙ НИКЕЛЕВОЙ
РУДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ «БАТАМША» ГАЗООБРАЗНЫМИ
ВОССТАНОВИТЕЛЯМИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ
«HSC CHEMISTRY 10»**

В данной статье проведено моделирование процесса низкотемпературного твердофазного восстановления никелевой латеритной руды месторождения «Батамша» с использованием программного комплекса «HSC Chemistry 10». Рентгенофазовым анализом был определен фазовый состав никелевой руды: 1,43% NiO, 5,2% Fe₂O₃, 9,4% Fe₃O₄, 6% FeO·OH, 5,4% Fe₂SiO₄, 0,27% FeS, 4,2% MgSiO₃, 12,4% Mg₃Si₂O₅(OH)₄, 35,1% CaAl₂Si₂O₈, 17,8% SiO₂ и 2,8% CaCO₃. Полученные данные были использованы для расчёта молярного состава никелевой руды, необходимого для определения количества молей компонентов, участвующих в реакции восстановления оксидных соединений в руде, с применением программного комплекса «HSC Chemistry 10». Термодинамика процесса восстановления изучена с применением модуля Equilibrium Composition, который осуществляет расчёт методом минимизации свободной энергии Гиббса, что позволяет определить равновесные составы взаимодействующих фаз. Изучались процессы восстановления никелевой латеритной руды монооксидом углерода и его смесью с водородом в соотношениях (1:1), (1:2) и (1:3). Исследование с использованием монооксида углерода в качестве восстановителя показало, что восстановление никеля начинается при 440 °С, полное восстановление достигается при расходе восстановителя 1,1 моль при температуре 900 °С. Исследование показали, что добавление водорода к СО значительно снижает температуру начала восстановления и полного