

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.791.927.5

doi: 10.30987/2782-5957-2026-8-39-50

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ НАПЛАВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ИХ ОБРАБАТЫВАЕМОСТЬ ЛЕЗВИЙНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Александр Петрович Новоточинов^{1✉}, Александр Андреевич Владимиров², Егор Алексеевич Кудинов³

^{1,2,3} Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСИС», Старый Оскол, Россия

¹ alexander.nowotochinov@yandex.ru

² vladimirov.al.an@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7992-1694>

³ kudinov19991704@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-3545-1538>

Аннотация

Цель работы заключается в исследовании влияния свойств наплавочных материалов на их обрабатываемость лезвийным инструментом при торцевом фрезеровании.

Задача: исследовать влияние свойств наплавочных материалов на их обрабатываемость по сравнению с эталонным материалом из стали 45.

Представлен литературный обзор по методике обработки труднообрабатываемых и закаленных материалов. Описаны достоинства и недостатки разных методов механической обработки наплавочных материалов и закаленных сталей. В программном комплексе Deform смоделирован процесс фрезерования наплавочного материала и стали 45 методом конечных элементов. Представлены результаты моделирования и их анализ. Произведена механическая обработка наплавленных поверхностей и эталонного образца из стали 45 на фрезер-

ном станке со скоростью резания 56 м/мин и глубиной 0,5 мм.

Новизна работы заключается в исследовании влияния свойств наплавленных поверхностей с тугоплавкими компонентами на обрабатываемость резанием в сравнении с обработкой стали 45.

Представлено сопоставление результатов моделирования фрезерования в программном комплексе Deform и экспериментальных исследований. Измерены и проанализированы шероховатость обработанной поверхности, износ режущего инструмента, размер и внешний вид стружки.

Выводы: по результатам исследований определен наплавочный материал, обеспечивающий повышенную износостойкость и удовлетворительную обрабатываемость лезвийным инструментом.

Ключевые слова: проволока, износ, компоненты, наплавка, фрезерование, резание, шероховатость, поверхность, метод конечных элементов.

Ссылка для цитирования:

Новоточинов А.П. Влияние свойств наплавочных материалов на их обрабатываемость лезвийным инструментом / А.П. Новоточинов, А.А. Владимиров, Е.А. Кудинов // Транспортное машиностроение. – 2026. – № 8. – С. 39-50. doi: 10.30987/2782-5957-2026-8-39-50.

Original article

Open Access Article

INFLUENCE OF THE PROPERTIES OF SURFACING MATERIALS ON THEIR MACHINABILITY WITH A BLADED TOOL

Aleksandr Petrovich Novotochinov^{1✉}, Aleksandr Andreevich Vladimirov², Egor Alekseevich Kudinov³

^{1,2,3} Stary Oskol Technological Institute named after A.A. Ugarov (branch of NUST MISIS), Stary Oskol, Russia

¹ alexander.nowotochinov@yandex.ru

² vladimirov.al.an@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7992-1694>

³ kudinov19991704@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-3545-1538>

Abstract

The paper objective is to study the effect of the properties of surfacing materials on their machinability with a blade tool during end milling.

The task is to study the effect of the properties of surfacing materials on their machinability in comparison with the reference material made of 45 steel.

A literature review on the method of machining tough and hardened materials is presented. The advantages and disadvantages of various methods of mechanical machining of surfacing materials and hardened steels are described. *Deform* software package simulates the process of milling of surfaced material and steel using the finite element method. The simulation results and their analysis are presented. The deposited surfaces and a reference sample made of 45 steel were machined on a milling system with a cutting speed of 56 m/min and a depth of 0.5 mm.

Reference for citing:

Novotochinov AP, Vladimirov AA, Kudinov EA. Influence of the properties of surfacing materials on their machinability with a blade tool. *Transport Engineering*. 2026;8:39-50. doi: 10.30987/2782-5957-2026-8-39-50.

Введение

Одним из эффективных способов восстановления изношенных поверхностей деталей машин является автоматизированная электродуговая наплавка под слоем флюса с применением порошковой проволоки, модифицированной тугоплавкими компонентами. Применение данной технологии и материалов позволяет повысить эксплуатационные характеристики восстановленных поверхностей за счет внедрения тугоплавких компонентов в состав шихты порошковой проволоки.

Введение в состав шихты порошков тугоплавких компонентов таких, как вольфрам и карбид вольфрама, способствует модифицированию структуры наплавленного слоя путем повышения твердости и износостойкости. Введение порошка гексагонального нитрида бора способствует улучшению антифрикционных свойств и повышению термостойкости наплавленного материала. Повышение эксплуатационных характеристик деталей машин является неотъемлемой частью современных промышленных предприятий. Новые технологические решения позволяют увеличить срок эксплуатации промышленного оборудования, что способствует снижению себестоимости готовой продукции и повышению конкурентоспособности на внутреннем и внешнем рынках страны.

The novelty of the work lies in the study of the effect of the properties of deposited surfaces with refractory components on the machinability of cutting in comparison with the machining of 45 steel.

A comparison of the results of milling modeling in *Deform* software package and experimental studies is presented. The roughness of the treated surface, the wear of the cutting tool, the size and appearance of the chips are measured and analyzed.

Conclusions: based on the research results, a surfacing material has been determined that provides increased wear resistance and satisfactory machinability with a bladed tool.

Keywords: wire, wear, components, surfacing, milling, cutting, roughness, surface, finite element method.

В металлургическом производстве одним из основных составляющих транспортных узлов непрерывного цикла являются ролики рольгангов. Система роликовых конвейеров позволяет непрерывно и ритмично передавать заготовку вдоль всей технологической линии, начиная от машины непрерывного литья заготовок до проката готовой продукции. Основной причиной замены роликов рольганга является механический износ поверхности роликов, превышающий допустимые значения. Увеличение эксплуатационных характеристик рабочих поверхностей ролика является актуальной проблемой.

Одним из востребованных методов восстановления поверхностей с повышением эксплуатационных характеристик является метод электродуговой наплавки порошковыми проволоками. Разработка комплексной технологии восстановления с упрочнением рабочих поверхностей роликов рольгангов требует определения рационального соотношения увеличения эксплуатационных характеристик и обеспечения удовлетворительной обрабатываемости резанием. При обработке наплавленных поверхностей также необходимо сохранение достигнутых механических свойств.

Литературный обзор

В промышленности используют разные методы механической обработки в технологических процессах изготовления и восстановления деталей машин [1, 2]. Процесс восстановления изношенных поверхностей деталей в области предварительной обработки перед наплавкой поверхности и окончательной механической обработки после нее имеет ряд особенностей: всевозможные повреждения изношенной поверхности, предварительная обработка которой требует специального подхода; повышенная твердость, полученная закаливанием в процессе эксплуатации; неравномерность и неоднородность наплавленной поверхности; наличие всевозможных неметаллических включений, примесей, карбидов и оксидов в наплавленном слое [3–7].

В [8] авторами были проведены эксперименты по способам термофрикционной механической обработки для увеличения механических характеристик наплавленного материала. При моделировании термофрикционного фрезерования и термофрикционного фрезерования с импульсным охлаждением изменялись скорость вращения инструмента (1000...3000 об/мин), скорость подачи (80...300 мм/мин) и глубина резания (0,5...2,5 мм). На основании представленных результатов было отмечено, что в каждом из методов при увеличении глубины резания и скорости подачи твердость наплавленного материала возрастает, однако увеличение скорости резания способствует уменьшению твердости. Наличие остаточных напряжений в наплавленном слое приводит к образованию микротрещин и в последствии к разрушению поверхности детали.

В [9] авторами особое внимание уделено исследованиям качества выпускаемой продукции при резании труднообрабатываемых материалов. Главным направлением исследований является выявление и устранение внутренних остаточных напряжений. Авторы отмечают, что внутренние напряжения являются наиболее опасными при работе детали в условиях знакопеременных нагрузок, что может повлиять на усталостную прочность и

уменьшить предел выносливости материала детали. Наличие остаточных напряжений отрицательно сказывается на результате механической обработки, вызывая коробление изделий. Поэтому для резания труднообрабатываемых материалов авторы предлагают использовать высокоэффективные методы, которые включают в себя высокоскоростное фрезерование, позволяющее при помощи программы ЭВМ регулировать режимы резания в процессе обработки детали, обеспечивая требуемые параметры при последующем воздействии на деталь. Конкретных режимов резания в работе не указано.

Коллектив авторов [10] приводит результаты экспериментальных исследований по механической обработке фрезерованием и шлифованием наплавленных поверхностей пружинной проволокой 2-го класса под слоем флюса сразу же после наплавки. Наплавленная поверхность детали обрабатывалась фрезерованием торцевой фрезой с восемью твердосплавными пластинами T15K6 сразу же после наплавки. Глубина фрезерования составляла 0,9 мм, шероховатость при этом составляла $R_z=10...25$ мкм. Сравнение обработки (шлифованием) наплавленного слоя в остывшем состоянии (20 °С) и в горячем состоянии (800 °С) сразу после отвода наплавочного оборудования позволило выявить следующее: при шлифовании в холодном состоянии на поверхности были отмечены глубокие риски от зерен шлифовального круга, структура металла – очень мелкоигльчатый мартенсит, микротвердость до 5,6 ГПа; при шлифовании в горячем состоянии на поверхности были зафиксированы лишь поперечные полосы от продольной подачи круга, структура металла – мелкоигльчатый мартенсит с остаточным аустенитом, микротвердость до 8,2 ГПа. На основании исследований авторами установлено, что при горячем шлифовании исчезают шлифовальные трещины, повышается микротвердость чистой поверхности детали.

Автор работы [11] неоднократно отмечает труднообрабатываемость наплавочного материала ввиду химической не-

однородности структуры металла, присутствия пор, шлаковых включений, неметаллических включений, трещин и других особенностей структуры наплавленного слоя в поверхностных слоях. Проанализированы различные методы механической обработки наплавочных материалов. Например, обработка абразивным шлифованием высокотвердых наплавленных поверхностей нецелесообразна из-за интенсивного износа абразивных кругов, обработка наплавленных слоев точением влечет за собой повышенный износ инструмента, по сравнению с обработкой сталей и чугунов. Автор предлагает оптимальные геометрические характеристики резцов для точения и значения скорости резания 20...40 м/мин, скорости подачи 0,07...0,12 мм/об, глубины резания 0,5...1,5 мм, материала режущих инструментов из твердых сплавов марок ВК6М, ВК8, Т15К6 и Т30К4 и сверхтвердые материалы.

Авторы [12], сравнивают механическую обработку наплавленных поверхностей, инструментом различной формы. При увеличении заднего угла режущей пластины на величину 12...15° происходит ослабление режущего клина, при снижении угла до 2...4° происходит затирание пластины, рекомендуется выдерживать угол (α) в пределах 5...12°. Приоритетными в обработке наплавленного материала являются пластины, с наплавкой из киборита, их использование позволяет увеличить производительность обработки до 5 раз при пропорциональном увеличении стойкости самих пластин по сравнению с твердосплавными пластинами Т15К6. Установлено, что на обрабатываемость наплавочного материала можно положительно повлиять на стадии наплавки восстанавливаемой поверхности детали, за счет качественного покрытия. Так разброс твердости по глубине покрытия не должен превышать более чем на 15...20 %, разброс высоты профиля поверхности не должен превышать 1,0...1,5 мм.

Исследователи в [13] подобрали рациональные режимы резания при точении труднообрабатываемой стали за счет применения пластины из кубического нитрида бора. За счет повышения скорости резания

до 90 м/мин, адгезионный износ уменьшается, при этом повышение температуры в зоне резания способствует увеличению влияния химического износа. По результатам исследования были предложены режимы резания: $V = 90$ м/мин; $S = 0,075$ мм/об.; $t = 0,25...0,5$ мм.

Для нахождения оптимального метода механической обработки Иванов И.Е. в работе [14] проводит анализ литературных источников, где указывает недостатки различных методов обработки наплавленных материалов повышенной твердости. Далее математическим путем высчитывает оптимальный передний угол с точки зрения прочности резца, который при минимальном касательном напряжении имеет значение 0°. Следует придерживаться того, что для обработки наплавленных материалов высокой твердости используют два основных способа механической обработки, это лезвийным методом и использование абразивного инструмента, при этом следует применять резцы из сверхтвердых материалов и алмазные круги, соответственно.

В работе [2] авторами представлена классификация твердосплавного инструмента исходя из твердости наплавленного слоя, например, при твердости до 40 HRC, используют пластины Т5К10, Т15К6 и ТТ7К12, при твердости выше 40 HRC рекомендуют использовать ВК6, ВК6М. Пластины из сплава ТН20 не рекомендуются использовать, так как они значительно уступают сплавам ТТК и ТК. Также отмечено, что геометрические параметры резца влияют на шероховатость поверхности, например, при отрицательном переднем угле (γ) возрастает параметр шероховатости R_a . Так, передний угол (γ) рекомендуют использовать не менее минус семи градусов.

В монографии [15] приведены сравнительные экспериментальные данные по обработке наплавленного слоя порошковой проволокой ПП-Нп-18Х1Г1М. При обработке твердосплавными пластинами Т15К6 стойкость резцов составила 25...30 мин, наблюдались частые поломки инструмента. Применение резцов из поликристаллического сверхтвердого материала (киборит) позволило повысить произво-

длительность в 3...5 раз, период стойкости при этом составил 90...120 мин. Поверхности, наплавленные проволокой Св08А рекомендуется обрабатывать твердым сплавом марки Т5К10 при скоростях резания до 50 м/мин. Обработка покрытий, твердостью до 40...45 HRC, пластинами Т5К10 рекомендуется со скоростью менее 40...45 м/мин, подачей не более 0,15...0,3 мм/об и глубиной резания 0,5...1,0 мм, при увеличении твердости наплавленного материала рекомендуется снизить скорость обработки.

Обработка наплавленных поверхностей сопровождается более интенсивными нагрузками и вибрациями, чем при обработке углеродистых и низколегированных сталей [2, 16]. Основной контакт режущего инструмента происходит по главной и вспомогательной режущим кромкам. В зоне резания наблюдается значительное повышение температуры, что является следствием упрочнения и разупрочнения наплавленного слоя [2, 7].

В [17] отмечено, что твердость оказывает существенное влияние на износ инструмента, в частности удвоение твердости способствует увеличению силы резания в 1,5 раза. При этом происходит уменьшение ширины и площади контакта стружки по передней поверхности до пяти раз, т.е. при увеличении твердости определяющее значение для рационального режима резания оказывает величина переднего угла. Также отмечено, что при обработке материала повышенной твердости большее усилие передается задней поверхности резца, в результате чего износ по задней поверхности оказывается выше. Рациональную температуру в зоне резания при обработке материалов высокой твердости необходимо регулировать скоростью резания.

Известно, что скорость резания оказывает существенное влияние на стойкость инструмента. Так в [2] отмечено, что повышение скорости резания прямо пропорционально влияет на увеличение температуры в зоне резания, что является причиной снижения стойкости инструмента. Однако, при низких скоростях резания происходит выкрашивание и истирание режущих кромок.

Некоторые наплавочные материалы нецелесообразно обрабатывать методами лезвийной обработки из-за быстрого изнашивания резца [7, 18]. Обработку подобных наплавочных материалов рекомендуют производить шлифованием [2], где достигаются высокие показатели точности обработки. В качестве абразивного инструмента широко используются круги из эльбора, стойкость которых до пяти раз превышает стойкость инструмента из электрокорунда, карбида кремния и синтетических алмазов [2, 7, 18]. Однако, обработка шлифованием может отрицательно сказываться на качестве обработанной поверхности, в частности, может происходить образование локальных «прижогов». Возникновение локальных «прижогов» на обработанной поверхности сопровождается остаточными напряжениями, которые впоследствии приводят к образованию микротрещин и снижению усталостной прочности детали. Недостатком обработки шлифованием является шаржирование обрабатываемой поверхности [2]. Правомерно предложить, что для обработки ответственных поверхностей деталей машин следует использовать лезвийные инструменты с повышенными эксплуатационными свойствами, имеющими большой ресурс [20].

Торцевое фрезерование схоже по параметрам обработки с точением плоских поверхностей при помощи проходного резца [21]. Выбор геометрических параметров происходит исходя из обработки материала и состава режущих пластин. Например, для твердосплавных пластин при обработке сталей высокой твердости и наплавленных поверхностей, главный передний угол γ выбирается в пределах $\pm 10^\circ$ [22].

Определяющим параметром критериев износа режущего инструмента является износ по задней поверхности пластины. Данный параметр износа принят как определяющий, т.к. износ задней поверхности происходит при любом методе лезвийной обработки и его фиксация значительно проще, по сравнению с износом глубины лунки [22]. Допустимый износ

пластин по задней поверхности при фрезеровании стали составляет 1,0...1,2 мм [21].

Тугоплавкие компоненты наплавочных проволок, в зависимости от их обрабатываемости, делят на группы: 1 – вольфрам и его компоненты; 2 – молибден, хром и их сплавы; 3 – ниобий, тантал, ванадий [23]. Черновую обработку таких по-

Материалы, эксперименты и методы

Для проведения экспериментальных исследований по обработке наплавленных поверхностей целесообразно смоделировать процесс резания в программном комплексе, где можно проанализировать влияния свойств наплавленной поверхности на обрабатываемость резанием, для рационального выбора режущего инструмента и параметров резания в экспериментальных исследованиях.

Для оценки влияния свойств наплавленных поверхностей на процесс резания, в частности на поля температур и напряженно-деформированное состояние инструмента и заготовки было принято решение о проведении моделировании методом конечных элементов в программном комплексе *Deform*.

Было смоделировано две базы данных с аналогичными режимами резания, но с разными материалами образцов: скорость – $v = 56,5$ м/мин, глубина – $t = 0,5$ мм, подача – $S_0 = 24$ мм/мин.

В качестве обрабатываемых материалов были выбраны сталь *AISI-431* (стандарт США) с твердостью 52 HRC, являющаяся аналогом основы наплавочной проволоки, и сталь 45, в качестве эталонного образца для исследования обрабатываемости. В качестве материала режущего инструмента был выбран твердый сплав WC (карбид вольфрама). Заготовка задавалась пластичной, а инструмент являлся жестким.

Анализ температур в зоне контакта режущей кромки и обрабатываемой заготовки, позволил выявить повышенную температуру при обработке наплавленной поверхности по сравнению с моделированием эталонного материала.

верхностей рекомендуется производить на режимах: подача 0,25...0,3 мм/об, скорость 46...61 м/мин. Для чистовой обработки рекомендуется изменить режимы резания до следующих значений: подачу уменьшить до 0,18...0,23 мм/об, а скорость увеличить до 61...91 м/мин [23].

Следующим шагом по исследованию результатов моделирования, был анализ напряжений и сил резания. Результаты моделирования напряжений и окружной силы P_z для шага № 1500 представлены на рис. 1.

Из результатов моделирования очевидно, что напряжения, при фрезеровании наплавленного слоя больше, чем при фрезеровании стали 45. Стоит отметить, что максимальные значения напряжений при фрезеровании наплавленного слоя сосредотачиваются у вершины режущего инструмента и распространяются вглубь срезаемого слоя на глубину 0,38 мм со значением 1590 МПа. Анализируя график нагрузки от времени фрезерования, можно отметить наличие скачкообразного характера, что является следствием повышенных усилий при резании и неустойчивости процесса обработки (рис. 1а).

При моделировании фрезерования стали 45 наблюдается другой характер распределения напряжений в тело срезаемого слоя, при котором напряжения проходят по наклонной траектории, по направлению образования опережающей трещины со значениями в диапазоне от 1020 до 1170 МПа (рис. 1б). На графике нагрузки от времени фрезерования также прослеживается скачкообразный характер, но в меньшем диапазоне значений.

Также наблюдаются некоторые отличия в осевой силе резания. Например, при моделировании фрезерования наплавленной поверхности сила $P_o = 479$ Н (рис. 2а), при моделировании фрезерования стали 45 – $P_o = 319$ Н (рис. 1б), что является следствием разных физико-механических свойств материалов.

Таким образом, на основании результатов моделирования методом конечных

элементов выявлены отличия в физико-механических характеристиках обрабатываемой наплавленной поверхности и стали 45:

– температура в зоне резания была выше при моделировании фрезерования наплавленной поверхности на 361 °С;

– глубина и характер распределения напряжений в зоне резания, например, для обработки наплавленной поверхности определяющей трещины, в виде концентрации напряжений, не наблюдается.

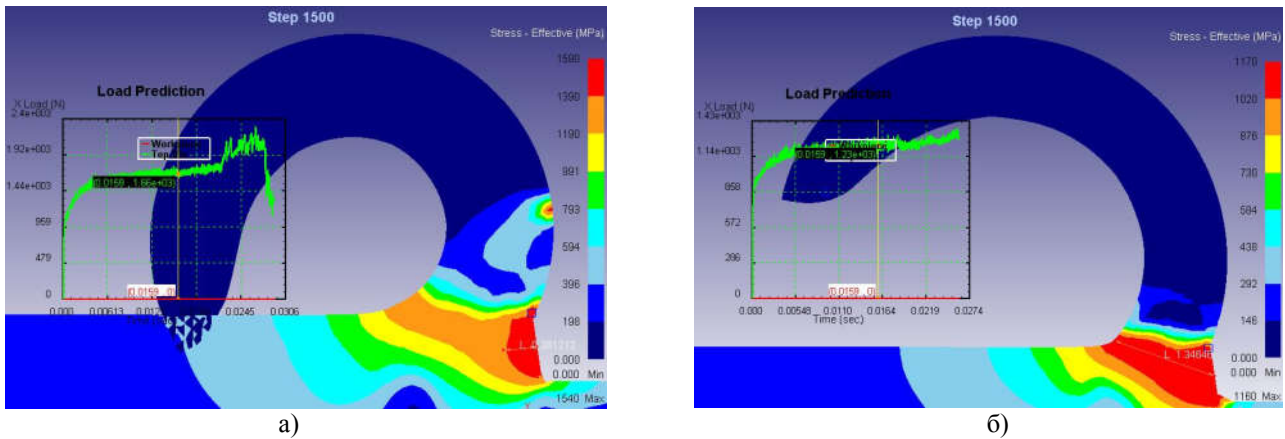


Рис. 1. Напряжения и окружная сила резания P_z при моделировании фрезерования (шаг №1550): а – наплавленного слоя, б – стали 45
Fig. 1. Stresses and circumferential cutting force P_z during milling simulation (step No.1550): a – deposited layer, b – grade 45 steel

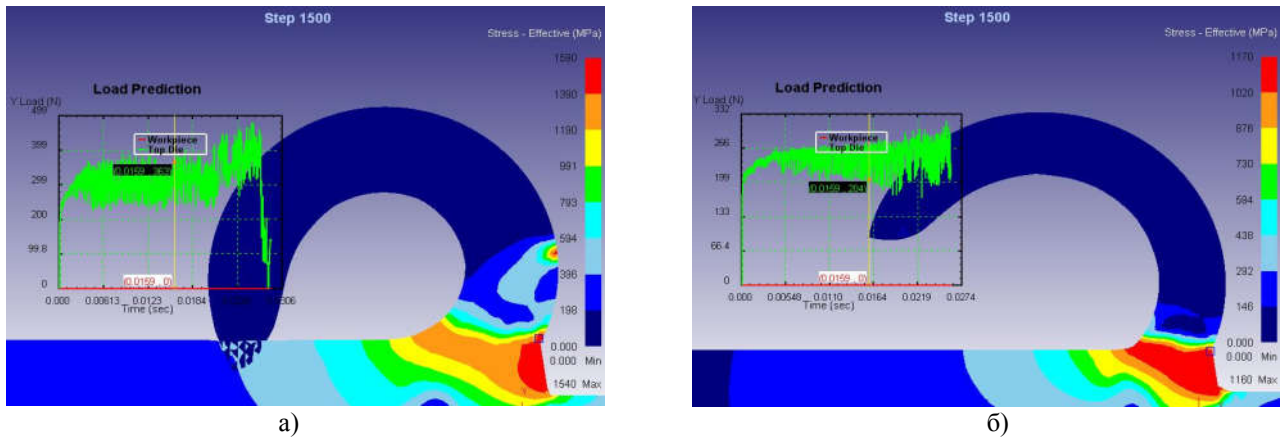


Рис. 2. Напряжение и осевая сила резания P_o при моделировании фрезерования (шаг №1500): а – наплавленного слоя, б – стали 45
Fig. 2. Stress and axial cutting force P_o during milling simulation (step No. 1500): a – deposited layer, b – 45 steel

Для оценки параметров обрабатываемости были подготовлены образцы для механической обработки фрезерованием. Основное отличие в свойствах наплавлен-

ных поверхностей заключалось в соотношении тугоплавких компонентов (табл. 1) [25].

Таблица 1

Количество тугоплавких компонентов в порошковой проволоке в %

Table 1

The number of refractory components in the powder wire in %

Наименование порошкового компонента	Процентное содержание компонентов, %			
	ACM -10	ACM -11	ACM -14	ACM -15
Вольфрам W	-	-	5,0	4,5
Карбид вольфрама WC	6	10	4,3	2,5
Гексагональный нитрид бора марки A, BNг	0,3	0,4	0,3	0,3

Экспериментальное фрезерование образцов производилось на вертикально-фрезерном станке модели *JMD-939GH*, фрезой с четырьмя пластинами из твердого

сплава марки Т5К10. Режимы резания были следующие: $v = 56$ м/мин; $S_m = 24$ мм/мин; $t = 0,5$ мм; $n = 360$ об/мин.

Результаты, обсуждение

В результате экспериментов по фрезерованию наплавленных материалов, в сравнение со сталью 45 было выполнено двадцать четыре прохода, суммарная глу-

бина фрезерования составила 12 мм. Внешний вид образцов после фрезерования представлены на рис. 3.



Рис. 3. Образцы после фрезерования: сталь 45, ACM-10, ACM-11, ACM-14, ACM-15
Fig. 3. Samples after milling: steel 45, ASM-10, ASM-11, ASM-14, ASM-15

Износ пластин после двадцати четырех проходов фрезерования наплавленных материалов для состава ACM-11 представлен на рис. 4, где наблюдался максималь-

ный износ – от 2,79 мм до 3,32 мм. Для состава ACM-14, наблюдался минимальный износ – от 2,18 мм до 3,06 мм (рис. 5).



Рис. 4. Износ пластин после фрезерования наплавленного слоя ACM-11, 24-ый проход
Fig. 4. Wear of plates after milling the deposited layer of ASM-11, 24th pass



Рис. 5. Износ пластин после фрезерования наплавленного слоя ACM-14, 24-ый проход
Fig. 5. Wear of plates after milling the deposited layer of ASM-14, 24th pass

В процессе проведения экспериментов по фрезерованию наплавленных материалов и стали 45 производилась фиксация величины износа пластин, шероховатости обработанной поверхности, размеры и внешний вид стружки. Из анализа зависимости удельного износа пластин от количества проходов выявлено, что минимальный суммарный удельный износ соответ-

ствует наплавленному материалу марки ACM-14. При этом максимальный суммарный удельный износ наблюдается при обработке наплавленного материала ACM-10. Для стали 45 суммарный удельный износ пластин составляет $22,5 \times 10^{-4}$ мм/мм³, что в ≈ 3 раза меньше, чем для наплавленных поверхностей (рис. 6).

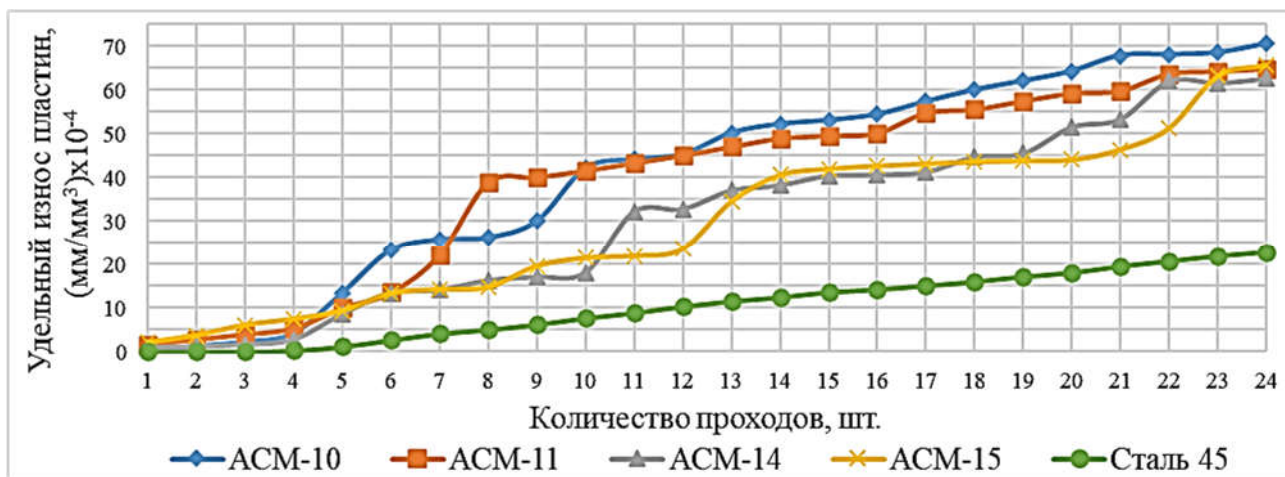


Рис. 6. Зависимость удельного износа пластин от количества проходов

Fig. 6. Dependence of specific wear of plates on the number of passes

Касательно оценки шероховатости поверхностей, целесообразно отметить, что шероховатость (R_a) поверхностей для наплавленных материалов находилась

диапазоне от 0,8 мкм до 3,0 мкм, а стали 45 от 2,8 до 5,2 мкм, что наглядно представлено на рис. 7.

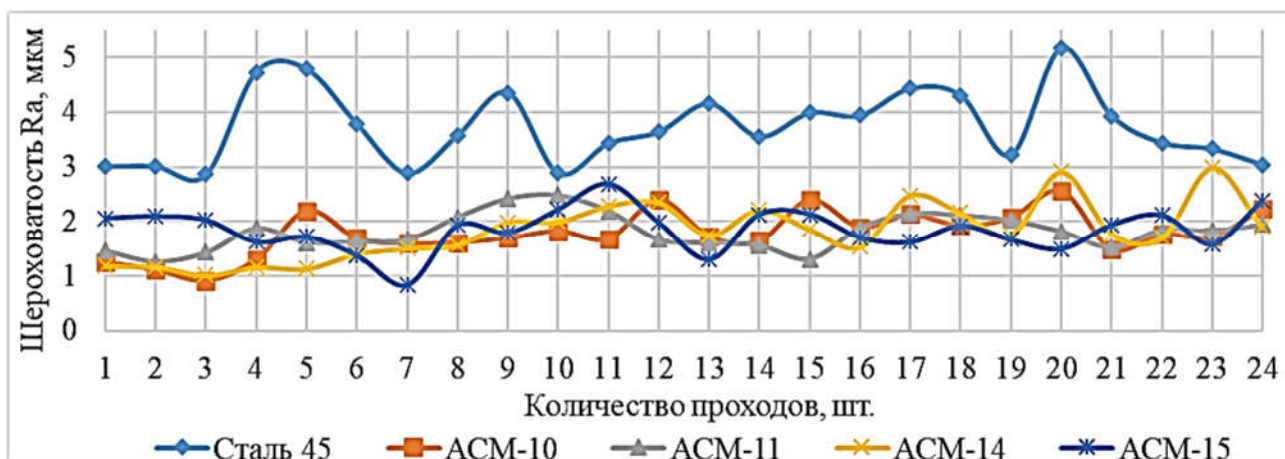


Рис. 7. Зависимость шероховатости поверхности от количества проходов

Fig. 7. Surface roughness dependence on the number of passes

Внешний вид и размеры стружки представлены на рис. 8, где, как для стали 45, так и для наплавленных поверхностей,

существенных отличий не выявлено, за исключением длины стружки для наплавленных материалов.

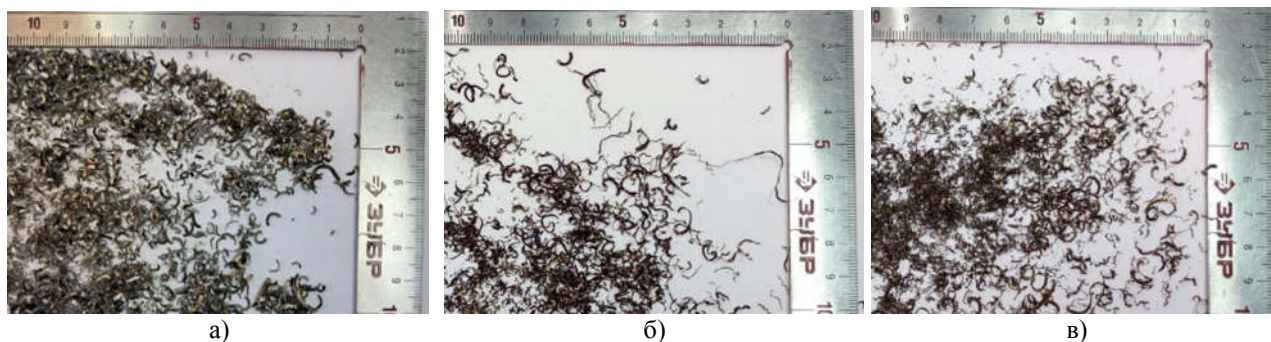


Рис. 8. Фото стружки при фрезеровании экспериментальных образцов: а – сталь 45, б – ACM-11, в – ACM-14

Fig. 8. Photo of milling chips from experimental samples: a – steel 45, b – ASM-11, c – ASM-14

В данных экспериментах целесообразно производить оценку обрабатываемости по указанным выше критериям. Значе-

ния критериев оценки обрабатываемости в сопоставлении со скоростью износа представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения критериев оценки обрабатываемости

Table 2

Values of machinability assessment criteria

Наименование образца	Сталь 45	АСМ-10	АСМ-11	АСМ-14	АСМ-15
Износ пластин, мм/мм ³ ·10 ⁻⁴	0,350	3,141	2,970	2,621	3,075
Шероховатость, Ra, мкм	3,761	1,930	1,864	1,985	1,871
Твердость, HRC	10	46,6	51,5	52	48
Скорость износа, W , 10 ⁻⁶ мм ³ · Н ⁻¹ ·м ⁻¹	-	2,66	2,72	1,88	2,59

Заключение

Из результатов теоретических и экспериментальных исследований обрабатываемости наплавленных материалов модифицированными тугоплавкими компонентами можно сформулировать следующие выводы:

– моделирование методом конечных элементов позволило определить повышенные температуры в зоне резания наплавленных материалов на 361 °С в отличие от стали 45;

– выявлен разный характер распределения напряжений в зоне контакта режущего инструмента с обрабатываемым материалом, так, что напряжения при моделировании фрезерования стали 45 проходят через срезаемый слой с максимальным значением напряжения 1170 МПа и способствует отрыву стружки от обрабатываемой заготовки;

– при моделировании фрезерования наплавленной поверхности напряжения проходят также, но максимальное напряжение локализуется только в пятне кон-

такта инструмента с заготовкой и составляет 1590 МПа;

– установлено, что максимальный износ пластин в диапазоне от 2,79 мм до 3,32 мм наблюдается для АСМ 11, минимальный износ в диапазоне от 2,18 мм до 3,06 мм для проволоки АСМ-14;

– выявлено, что шероховатость поверхности наплавленных материалов после фрезерования отличается не значительно, в пределах погрешности измерений.

Исходя из значений критериев обрабатываемости наплавленных материалов можно выделить материал АСМ-14, который при максимальной твердости удовлетворительной шероховатости, высокой износостойкости соответствует минимальному значению износа режущего инструмента. Таким образом можно сформулировать направления дальнейших исследований по определению рациональных режимах резания наплавочного материала АСМ-14.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лоладз Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1982. 320 с.
2. Четвериков С.В. Повышение эффективности технологии ремонта деталей машин: специальность 05.02.13. «Машины, агрегаты и процессы (машиностроение)»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Четвериков Сергей Владимирович; Чита, 2006. 156 с.
3. Обработка металлов резанием: Справочник технолога / А.А. Панов, В.В. Аникин, Н.Г. Бойли и

др.; По общ. ред. А.А. Панова. М.: Машиностроение, 1988. 736 с.

4. Подураев В.Н. Резани труднообрабатываемых материалов. М.: Высшая школа, 1974. 587с.
5. Прогрессивный режущий инструмент и режим резания металлов: Справочник / В.И. Баранчиков, А.В. Жариков, Н.Д. Юдин и др. М.: Машиностроение, 1990. 248 с.
6. Справочник по технологии резания металлов. В 2 кн. Кн. 1-2 // По ред. Г. Шпура, Т. Штеферле, Ю.М. Соломенцев. М.: Машиностроение, 1985. 616 с.

7. Хае Г.Л. Прочность режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1975. 168 с.
8. Иманбаев, Е., Шеров, К., Мардонов, Б., Махмудов, Л., Усербаев, М., & Куанов, И. (2022). Экспериментальное исследование твердости наплавленной поверхности при различных способах термофрикционного фрезерования. Вестник евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева серия: технические науки и технологии, 139(2), 62–71. <https://doi.org/10.32523/2616-7263-2022-139-2-62-71>.
9. Хусанов Ю. Ю., Абдуллаев Б. И. Обеспечение качества поверхностного слоя деталей при высокоскоростном торцевом фрезеровании закаленных сталей // Scientific progress. 2022. Т. 3. № 3. С. 156-165.
10. Бойко, Н. И. Исследование качества поверхности наплавленного металла цилиндрической детали обработанной в горячем состоянии / Н. И. Бойко, К. С. Фисенко // Инженерный вестник Дона. 2012. № 2(20). С. 51-55. EDN PCRPSH.
11. Ангелло, Г. Н. Обоснование рационального способа обработки высокотвердых наплавленных поверхностей / Г. Н. Ангелло // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2008. № 2(43). С. 79-83. EDN IJVMRR.
12. Клименко С.А. Механическая обработка наплавленных износостойких поверхностей / С.А. Клименко, И.П. Филонов, Ж.А. Мрочек, С.Л. Кожуро // Республиканский межведомственный сборник научных трудов / Минск: Технопринт, 2002. Вып. 18. С. 197-201.
13. Гартфельдер, В. А. Лезвийная обработка закаленных сталей инструментами из кубического нитрида бора / В. А. Гартфельдер, Л. С. Секлетина, А. Р. Янюшкин // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 1(45). С. 29-33. DOI 10.18324/2077-5415-2020-1-29-33. EDN UJTUEN.
14. Иванов, И. Е. Выбор оптимального метода механической обработки из условия прочности

режущего инструмента / И. Е. Иванов // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2012. № 24. С. 231-236. EDN TRNYYN.

15. Обработка резанием деталей с покрытиями / С. А. Клименко, В. В. Коломиец, М. Л. Хейфец, А. М. Пилипенко, Ю. А. Мельничук, В. В. Бурыкин. Под общей редакцией С. А. Клименко. К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2011. 353 с. ISBN 978-966-02-5994-2.
16. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. Л.: Машиностроение, 1986. 184 с.
17. Рыбик В.А. Повышение эффективности восстановления колесных пар подвижного состава: специальность 05.02.07. «Подвижной состав железных дорог и тяги поездов»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Рыбик Вадим Александрович; Омск, 2000. 166 с.
18. Трнет Е.М. Резание металлов / Пер. с англ. Г.И. Айзенштока. М.: Машиностроение, 1980. 264 с.
19. Силин С.С. Метод подбора при резании материалов. М.: Машиностроение, 1979. 152 с.
20. Рыжов Э.В., Клименко С.А., Гуцаленко О.Г. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями. Киев: Наук. думка, 1994. 182 с.
21. Ящерицын П.И., Еременко М.Л., Жигалко Н.И. Основы резания материалов и режущий инструмент. Минск, «Вышэйш. Школа», 1975. 528 с.: ил.
22. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов. Машиностроение. М., 1975. 344 с.: ил.
23. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. Учеб. Пособие для вузов. М., «Вышш. школа», 1974. 587 с.: ил.
24. Новоточинов А.П., Кудинов Е.А., Владимиров А.А. Влияние тугоплавких компонентов на износостойкость наплавленного материала // Транспортное машиностроение. 2025. № 8. С. 12-26. DOI: 10.30987/2782-5957-2025-8-12-26.

REFERENCES

1. Loladz TN. Strength and wear resistance of cutting tools. Moscow: Mashinostroenie; 1982.
2. Chetverikov SV. Improving the efficiency of repair of machine parts [dissertation]. [Chita (RF)]; 2006.
3. Panov AA, Anikin VV, Boily NG. Metalworking by cutting: handbook of a technologist. Moscow: Mashinostroenie; 1988.
4. Poduraev VN. Cutting of hard-to-machine materials. Moscow: Vysshaya Shkola; 1974.
5. Baranchikov VI, Zharikov AV, Yudin ND. Progressive cutting tools and metal cutting mode: handbook. Moscow: Mashinostroenie; 1990.
6. Shpura G, Shteflerle T, Solomentsev YuM, editors. Handbook of metal cutting technology. Moscow: Mashinostroenie; 1985.
7. Khayet GL. Strength of the cutting tool. Moscow: Mashinostroenie; 1975.

8. Imanbaev E, Sherov K, Mardonov B, Makhmudov L, Userbaev M, Kuanov I. Experimental study of the hardness of the deposited surface with various methods of thermofriction milling. Eurasian Journal of Applied Engineering and Technology [Internet]. 2022;139(2):62-71. Available from: <https://doi.org/10.32523/2616-7263-2022-139-2-62-71>
9. Khusanov YuYu, Abdullaev BI. Quality assurance of the surface layer of parts during high-speed end milling of hardened steels. Scientific Progress. 2022;3(3):156-165.
10. Boyko NI, Fisenko KS. Investigation of the surface quality of weld metal cylindrical part machined in hot condition. Engineering Journal of Don. 2012;2(20):51-55.
11. Angello GN. Substantiation of a rational method of machining high-hardness deposited surfaces. Vest-

- nik of Astrakhan State Technical University. 2008;2(43):79-83.
12. Klimenko SA, Filonov IP, Mrochek ZhA, Kozhuro SL. Mechanical processing of deposited wear-resistant surfaces. Republican Interdepartmental Collection of Scientific Papers. Minsk: Technoprint; 2002;18:197-201.
 13. Gartfelder VA, Sekletina LS, Yanushkin AR. Edge cutting machining of tempered steel with the help of tools made of cubic boron nitride. Systems. Methods. Technologies. 2020;1(45):29-33. DOI 10.18324/2077-5415-2020-1-29-33. EDN UJTUEN.
 14. Ivanov IE. Choosing the optimal method of mechanical processing taking into account the strength condition of cutting tools. Reporter of the Priazovskiy State Technical University. Technical Sciences. 2012;24:231-236. EDN TRNYH.
 15. Klimenko SA, Kolomiets VV, Kheifets ML, Pili-penko AM, Melniychuk YuA, Burykin VV. Cutting of coated parts. Kiev: V. Bakul Institute for Superhard Materials; 2011.
 16. Zharkov IG. Vibrations during machining with bladed tool. Leningrad: Mashinostroenie; 1986.

17. Rybik VA. Improving the efficiency of restoring wheel sets of rolling stock [dissertation]. [Omsk (RF)]; 2000.
18. Trnet EM. Cutting of metals. Moscow: Mashinostroenie; 1980.
19. Silin SS. Method of similarity in cutting materials. Moscow: Mashinostroenie; 1979.
20. Ryzhov EV, Klimenko CA, Gutsalenko OG. Technological quality assurance of coated parts. Kiev: Nauk. Dumka; 1994.
21. Yashcheritsyn PI, Eremenko ML, Zhigalko NI. Fundamentals of cutting materials and cutting tools. Minsk: Higher Education School; 1975.
22. Bobrov VF. Fundamentals of the theory of metal cutting. Moscow: Mashinostroenie; 1975.
23. Poduraev VN. Cutting of hard-to-treat materials: textbook for universities. Moscow: Vysshaya Shkola; 1974.
24. Novotochinov AP, Vladimirov AA. Effect of high-melting components on the wear resistance of the surfacing material. Transport Engineering. 2025;8:12-26. DOI: 10.30987/2782-5957-2025-8-12-26.

Информация об авторах:

Новоточинов Александр Петрович – ассистент кафедры физики и химии, тел. +79996079769, Author-ID-РИНЦ 1286628.

Владимиров Александр Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта, тел. +79205605185, Scopus-Author

Novotochinov Aleksandr Petrovich – Assistant of the Department of Physics and Chemistry, phone: +79996079769, Author-ID-RSCI 1286628.

Vladimirov Aleksandr Andreevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology and Equipment in Metallurgy and Mechanical Engineering named after V.B. Krakht,

ID 57214578618, Research-ID-Web of Science AAW-8223-2020, Author-ID-РИНЦ 818516.

Кудинов Егор Алексеевич – ассистент кафедры технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта, тел. +79194377008, Author-ID-РИНЦ 87278014.

phone: +79205605185, Scopus-Author ID 57214578618, Research-ID-Web of Science AAW-8223-2020, Author-ID-RSCI 818516.

Kudinov Egor Alekseevich – Assistant at the Department of Technology and Equipment in Metallurgy and Machine Engineering named after V.B. Krakht, phone: +79194377008, Author-ID-RSCI 87278014.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 07.04.2026; одобрена после рецензирования 03.07.2026; принята к публикации 27.07.2026. Рецензент – Петрешин Д.И., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 07.04.2026; approved after review on 03.07.2026; accepted for publication on 27.07.2026. The reviewer is Petreshin D.I., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.