

На правах рукописи

УДК 621.99

Цуканов Денис Валерьевич


**ПОДГОТОВКА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕФОРМИРУЮЩИМ РЕЗАНИЕМ
ДЛЯ ВВЕДЕНИЯ ТВЕРДЫХ СМАЗОК С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ
ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ
СТАЛЕЙ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА**

Специальность

2.5.5 – Технология и оборудование механической и
физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва - 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (Национальный исследовательский университет) (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный руководитель: Зубков Николай Николаевич
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты	Петухов Юрий Евгеньевич доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инструментальной техники и технологии формообразования ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет «СТАНКИН»
-----------------------	---

Моргунов Юрий Алексеевич
кандидат технических наук, доцент,
профессор кафедры технологии и
оборудования машиностроения ФГБОУ
ВО «Московский политехнический
университет»

Ведущая организация Всероссийский научно-исследовательский
инструментальный институт
«ВНИИИНСТРУМЕНТ»

Защита состоится « » 202 г. в час.
на заседании диссертационного совета 24.2.331.02 при МГТУ им. Н.Э. Баумана
по адресу 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр. 1

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Телефон для справок 8 (499) 263-66-33, доб. 40-57

Автореферат разослан « » 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
К.Т.Н., ДОЦЕНТ

Thoracæ

А.В. Богданов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности:

Актуальной задачей в области машиностроения является увеличение срока службы изделий, в которых используются трибосопряжения. Использование в паре трения подшипников скольжения обусловлено их высокой нагрузочной способностью и низкой стоимостью.

Наличие смазки обеспечивает снижение коэффициента трения, прогнозируемый износ трущихся поверхностей и является одним из основных условий их надежной работы. Наиболее широко используемые жидкие и консистентные смазочные материалы обладают рядом недостатков, накладывающих ограничения на их использование, например, в вакууме агрессивных и абразивных средах. В связи с этим широкое распространение получили твердые смазочные материалы (ТСМ).

Существует класс материалов, в структуре поверхности трения которых содержатся ТСМ: самосмазывающиеся металломатричные композиты (СММК) – представляющие собой основу, в матричной структуре которой содержатся ТСМ. Использование СММК в качестве элемента трибосопряжения снижает или устраняет потребность в жидкой или консистентной смазке, уменьшает трение и износ, а также позволяет увеличить срок службы компонентов трибосистемы.

Аустенитные коррозионностойкие стали обладают высокой коррозионной стойкостью, вследствие чего широко используются в медицинском оборудовании, химической промышленности и аэрокосмической отрасли. атомном и энергетическом машиностроении. Однако эти стали обладают низкими твердостью и трибологическими свойствами, что препятствует их широкому использованию в трибосопряжениях. Таким образом, актуальной задачей для исследователей является разработка новых технологий для повышения износостойкости нержавеющей сталей. Создание СММК с матрицами на основе аустенитных коррозионностойких сталей является перспективным направлением повышения триботехнических характеристик деталей трения.

Подшипники и свертные втулки из подобных материалов могут быть созданы различными способами: методом порошковой металлургии, литья, прессованием полимерных композитных материалов (ПКМ), спеканием на подложку, механическим - прессованием или внедрением вставок из ТСМ в макрорельеф, получаемый лезвийной обработкой поверхности. Перечисленные способы требуют высоких трудовых затрат при производстве, а в некоторых случаях требуют наличия дорогостоящего оборудования.

Перспективным вариантом механического получения макрорельефа для запрессовки ТСМ является метод деформирующего резания (ДР), который разрабатывался в работах Зубкова Н.Н., Овчинникова А.И., Васильева С.Г., Кононова О.В., Слепцова А.Д., Шуляка Я.И. Известно, что данный метод позволяет с высокой производительностью получать развитый макрорельеф в виде оребрения, у которого межреберный размер зазора составляет от единиц микрометров, при высоте ребра до единиц миллиметров, что недостижимо для

традиционных методов механической обработки, основанных на удалении материала. Другой особенностью структур, получаемых методом ДР, является упрочнение ребра в процессе обработки, что положительно сказывается на износостойкости материала.

Однако в настоящее время не раскрыты закономерности управления процессом ДР для получения макрорельефа с заданным соотношением толщины ребер к ширине межреберного зазора. Не определены ограничения ДР при обработке коррозионностойких сталей, не доказана эффективность внедрения ТСМ в макрорельеф, получаемый ДР. Нерешенность данных проблем не позволяет в полной мере использовать преимущества ДР для получения макрорельефа для последующего внедрения ТСМ, что обуславливает актуальность проведения теоретических и экспериментальных исследований по совершенствованию метода ДР применительно к узлам трения скольжения из коррозионностойких сталей аустенитного класса.

Цель и задачи работы: повышение триботехнических характеристик коррозионностойких аустенитных сталей введением твердых смазок в поверхностные матрицы, получаемые деформирующим резанием.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи работы

1. Определение особенностей макрорельефа моделированием процесса ДР методом конечных элементов и прогнозирование его реальных геометрических параметров.
2. Определение рациональных параметров, на основе экспериментальных исследований процесса ДР для получения металлических матриц с заданными геометрическими параметрами.
3. Разработка способов введения ТСМ в металлические матрицы, получаемые ДР.
4. Проведение триботехнических испытаний самосмазывающихся поверхностей трения с различными ТСМ.
5. Разработка рекомендаций по созданию металлических матриц методом ДР, внедрению в них твердосмазочных материалов и апробация рекомендаций в промышленности.

Научная новизна:

1. Разработана методология моделирования процесса ДР, которая на основе исходных геометрических параметров инструмента и режимов обработки позволяет получать достоверные трехмерные модели микрощелевых матриц.
2. Определена зависимость между геометрическими параметрами режущего инструмента для ДР, режимными параметрами обработки и устойчивой областью существования ребер на коррозионностойких аустенитных сталях типа 12X18H10T.
3. Установленная связь между истинной деформацией ребра в процессе ДР и увеличением твердости позволяет прогнозировать упрочнение ребра в зависимости от условий обработки.

Практическая значимость:

1. Доказана возможность получения самосмазывающихся поверхностей трения на коррозионностойких сталях аустенитного класса введением твердых смазок в поверхностные матрицы, получаемые ДР, позволяющих повысить удельную износостойкость до 20 раз и снизить коэффициент трения до 4-х раз по сравнению с исходным материалом.
2. Определены рациональные сочетания параметров ДР при получении поверхностных матриц, используемых для внедрения ТСМ, позволяющие получать в структуре поверхности содержание ТСМ от 10 до 35%.
3. Разработаны и переданы для промышленного использования руководящие технологические материалы и методики подготовки заготовок методом ДР под запрессовку терморасширенного графита.

Положения, выносимые на защиту:

1. Конечноэлементное моделирование в программе AdvantEdge на основе исходных технологических параметров обеспечивает получение достоверных трехмерных моделей единичных ребер.
2. Выявленная взаимосвязь технологических параметров процесса ДР и геометрических параметров получаемого макрорельефа на стали 12X18H10T позволяет выбирать геометрические параметры матрицы СММК в части максимальной высоты самосмазывающегося слоя и процентного содержания ТСМ.
3. Деформирующее резание стали 12X18H10T приводит к изменению фазового состава материала ребра с образованием мартенсита деформации из аустенита, сопровождающееся повышением твердости по всему ребру, но не приводящее к перераспределению легирующих элементов.

Методы исследования и достоверность полученных результатов:

Результаты экспериментальных исследований получены с использованием проверенных методик и современных аттестованных приборов. Была показана сходимость результатов моделирования с экспериментальными и теоретическими данными. Выводы теоретических исследований согласуются с результатами экспериментов. Достоверность разработанных практических рекомендаций подтверждается внедрением в производство.

Реализация работы: результаты диссертационной работы использованы: при подготовке руководящих технологических материалов и методик подготовки поверхностей методом ДР под запрессовку ТСМ на основе терморасширенного графита, переданных в ООО «Силур» для освоения производства самосмазывающихся узлов трения, а также при подготовке подшипников скольжения погружных насосов нефтяного оборудования в ООО «Нефтемаш-Деталь» для последующего введения антифрикционных полимерных материалов. Материалы диссертации используются в учебном процессе кафедры МТ2 в курсах лекций: «Спецглавы механической и физико-технической обработки» и «Современные методы механической и физико-технической обработки».

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на: Двенадцатой всероссийской конференции молодых ученых и

специалистов (с международным участием). Будущее машиностроения России (Москва, 2019 г); конференции молодых специалистов «Перспективы развития металлургических технологий». ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина» (Москва, 2020 г); Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» (Сочи, 2022г); 15-ой Международной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии в машиностроении» (Москва, 2023 г).

Личный вклад: Проведен анализ недостатков способов изготовления СММК. Произведено конечноэлементное моделирование процесса ДР в программном комплексе AdvantEdge. Выполнены экспериментальные исследования по ДР, проведена обработка и интерпретация экспериментальных данных. Разработана методика и проведены триботехнические испытания на трение и износ образцов из СММК, изготовленных ДР.

Публикации: основные положения диссертации опубликованы в 9 научных работах, в том числе 3 работы в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, 3 работы, индексируемые Scopus и 2 работы индексируемые WoS.

Структура и объем работы: диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, основных выводов, списка использованной литературы и приложений. Работа содержит 123 страницы, 61 рисунок, 11 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, изложены ее научная новизна и практическая значимость, приведена краткая характеристика работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования.

В первой главе по материалам отечественной и зарубежной литературы проведен анализ рационального использования самосмазывающихся материалов и обзор методов их изготовления.

Самосмазывающиеся металломатричные композиты (СММК) – материалы, в матричной структуре которых размещен твердый смазочный материал (ТСМ). СММК производятся в форме объемных композитов или покрытий. При эксплуатации СММК происходит высвобождение ТСМ из матрицы, что приводит к снижению коэффициента трения, повышению износостойкости и увеличению срока службы компонентов трибосистемы.

Твердые смазочные материалы обладают рядом преимуществ в сравнении с наиболее широко применяемыми жидкими и консистентными смазками: стабильны при эксплуатации в условиях высоких и криогенных температур, при работе в вакууме и повышенного давления, работоспособны в агрессивных и абразивных средах, эффективнее при прерывистых и высоких нагрузках, не требуют систем смазки и фильтрации, устойчивы к ионизирующему излучению.

Способы производства СММК можно разделить на следующие группы: объемные, поверхностные, формообразующие и конструктивные. В процессе производства СММК ТСМ должен сохранять свои исходные свойства и быть однородно диспергирован. Объемное содержание ТСМ в СММК обычно составляет 3...40 % в зависимости от условий эксплуатации, обеспечивая наличие трибопленки на поверхности матрицы в течение срока эксплуатации

СММК с минимально возможным снижением механических свойств самой матрицы.

В данной работе в качестве альтернативы формообразующего метода создания СММК предлагается использование метода деформирующего резания (ДР). Метод ДР основан на подрезании и пластическом деформировании подрезанных слоев. После подрезания и деформирования подрезанный слой сохраняет прочную связь с основой и образует ребро. По сути, образованное ребро — это стружка, не отделившаяся от заготовки по узкой стороне (Рисунок 1).

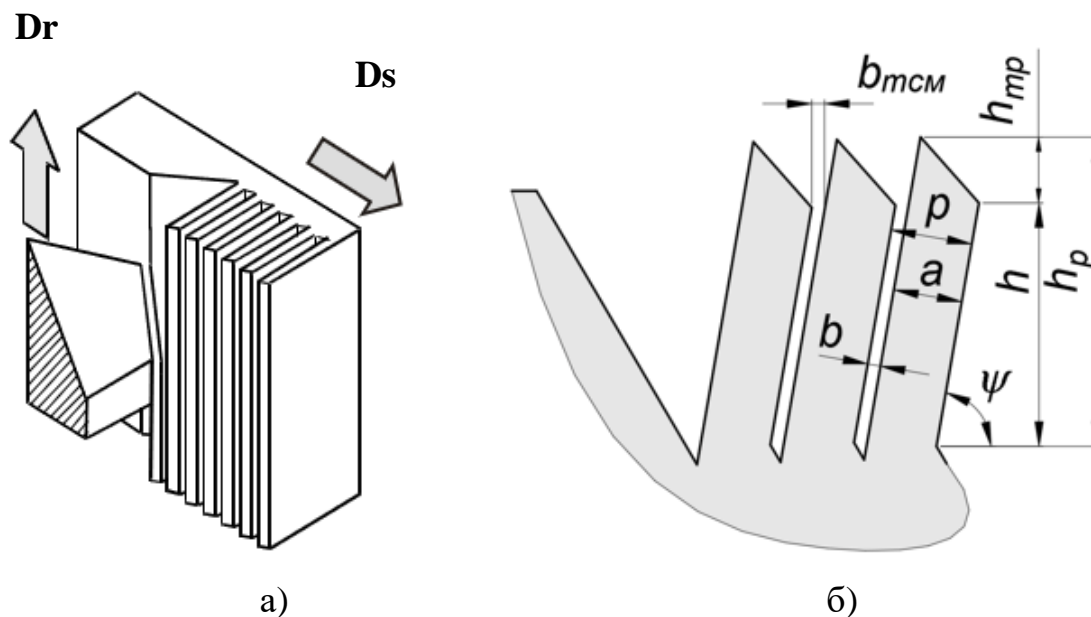


Рисунок 1. Принцип формирования микрощелевого рельефа ДР: а) – формирование ребер, б) – параметры макрорельефа после ДР

Варьирование параметров макрорельефа (высота, ширина, наклон и шаг щелей) достигается за счет изменения режимов ДР и геометрических параметров инструмента.

Возможно получение микрощелевой структуры с шагами (p) 0,2..1,0 мм, шириной щелей (b) от единиц до сотен микрометров, при глубине щелей (h) до 2,5 мм. При этом возможно регулировать отношение величины зазора к шагу, соответственно и объемного содержания ТСМ в материале, в широком диапазоне от одного до 40%. Наиболее подходящими с точки зрения изготовления СММК являются макрорельеф с минимальным наклоном ребер относительно вертикали ($\psi = 70...90^\circ$) с зазорами, удерживающими смазочный материал и позволяющими накапливать продукты износа, выводя их из зоны трения.

На Рисунке 2 представлена последовательность создания самосмазывающейся поверхности на основе метода ДР.

Таким образом анализ, возможностей ДР по диапазону геометрических параметров получаемого макрорельефа позволяет сделать вывод о целесообразности его использования в качестве матриц для СММК. Высокая

производительность и технологичность изготовления матриц для СММК методом ДР свидетельствуют об их конкурентоспособности и перспективности.

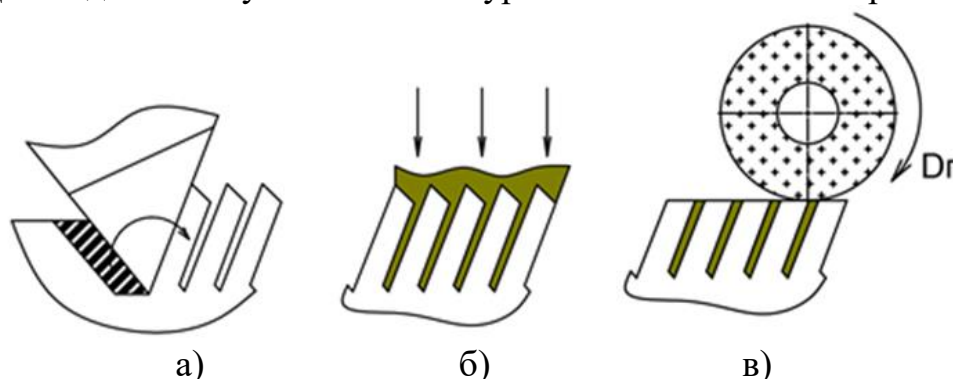


Рисунок 2. Последовательность создания самосмазывающегося материала: а) – оребрение поверхности трения методом ДР, б) – заполнение межреберного зазора ТСМ, в) – удаление треугольных заострений на вершине ребра

Во второй главе разработана методика моделирования процесса ДР методом конечных элементов в программном пакете ThirdWave AdvantEdge. Выбрана предпочтительная модель материала, описываемая степенным законом для моделирования ДР на материале 12X18H10T (AISI321), при использовании которой, получены данные о геометрических параметрах макрорельефа и микротвердости по сечению ребра для разных режимов обработки и при использовании различной геометрии инструмента.

Геометрические параметры матрицы, получаемые ДР, оказывают влияние на эксплуатационные характеристики СММК: несущую способность, износостойкость и содержание ТСМ на поверхности трения. Погрешность в геометрических размерах между реальными ребрами и данными, получаемыми по теоретическим зависимостям, составляет более 10 %, при этом аналитические зависимости не учитывают отклонение боковых сторон ребер от прямолинейности и вертикальности, непостоянство толщины ребра и межреберного зазора, что в ряде случаев оказывает существенное влияние на эксплуатационные характеристики получаемых структур. Моделирование процесса ДР на основе режимных параметров обработки и 3D-модели инструмента для ДР позволило получать достоверную информацию о геометрических параметрах микрорельефа.

Процесс расчета в AdvantEdge осуществляется с повторным адаптивным созданием сетки, позволяющим устранять нелинейности, возникающие из-за высокой скорости и высоких степеней пластических деформаций. Динамический размер области с адаптивным разбиением сетки принимался исходя из величины глубины резания (t) и составлял $3t$, а максимальная длина кромки элемента, внутри этой области – $0,1t$. При моделировании инструмент принимался абсолютно жестким, а заготовка - жестко-пластичной со свойствами материала. Для описания процессов резания использовалась модель сухого трения Кулона. Шаг перемещения инструмента задавался равным половине минимального размера.

Процесс моделирования осуществлялся для получения оребрения на плоскости при операции строгания при постоянной скорости резания $V_{рез}=1$ м/с, при глубине ДР равной шагу оребрения. Пунктирной линией отмечен теоретический профиль ребра, сплошной линией - результат моделирования, серым фоном наложен реальный профиль ребра, полученный по результатам эксперимента.

Для оценки влияния масштабного фактора моделирование проводилось при удвоении величины подачи, при этом глубина резания принималась равной величине подачи инструмента на двойной ход: $t_1=S_1=0,2$ мм; $t_2=S_2=0,4$ мм; $t_3=S_3=0,4$ мм (Рисунок 3).

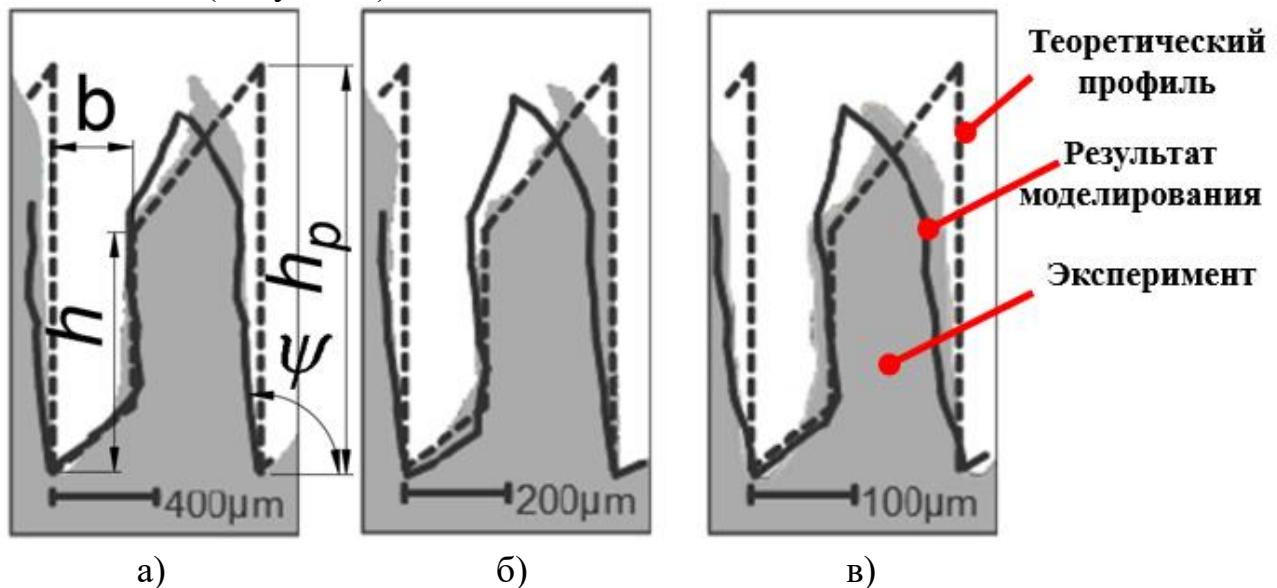


Рисунок 3. Сравнение результатов моделирования с теоретическим и реальным профилем оребрения. а) – $t_1=S_1=0,8$ мм; б) – $t_2=S_2=0,4$ мм; в) – $t_3=S_3=0,2$ мм

Моделирование процесса деформирующего резания в программе AdvantEdge позволило получить достоверные геометрические параметры оребренной структуры, соответствующие экспериментальным данным. По ширине зазора (b), высоте ребра без учета треугольного заострения его вершины (h) и полной высоте ребра (h_p) отклонение результатов, полученных в ходе моделирования, от экспериментальных данных составило не более 5%.

Использование моделирования формы и геометрических параметров оребрения, получаемого методом деформирующего резания, показало значительно большее соответствие с реально получаемым оребрением по сравнению с ранее используемыми аналитическими зависимостями.

Анализ распределения истинной деформации, полученной в результате моделирования ДР позволяет прогнозировать на основании установленных взаимосвязей между истинной деформацией и микротвердостью характер распределения микротвердости по ширине ребра (Рисунок 4).

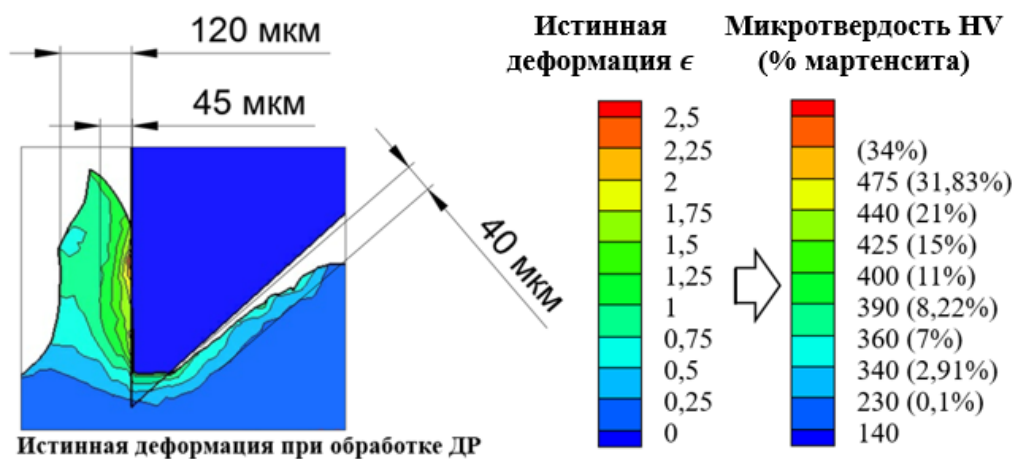


Рисунок 4. Упрочнение ребра в процессе обработки ДР

В третьей главе проведены экспериментальные исследования и установлены закономерности процесса ДР для стали 12Х18Н10Т, а именно: влияние способа подготовки поверхности на область устойчивого существования, расширена область существования ДР для резцов с различной геометрией, с учетом их применения для изготовления матриц СММК, предложен способ управления параметрами оребренной структуры разворотом инструмента ДР в основной плоскости.

Варьирование углами подрезания и отгибки за счет разворота инструмента в основной плоскости в диапазоне $\tau=0...20^\circ$ позволяет изменять соотношение ширины щелей к шагу и соответственно потенциальное содержание ТСМ на поверхности от 35 до 10% (Рисунок 5). При увеличении угла разворота инструмента в основной плоскости (увеличение угла подрезания (ϕ) и уменьшение угла отгибки (ϕ_1) инструмента происходит уменьшение размера межреберного зазора в матрице и изменение формы треугольного заострения. При увеличении угла наклона ребра происходит снижение полезной высоты получаемой щелевой матрицы и повышение опорной поверхности и несущей способности поверхности.

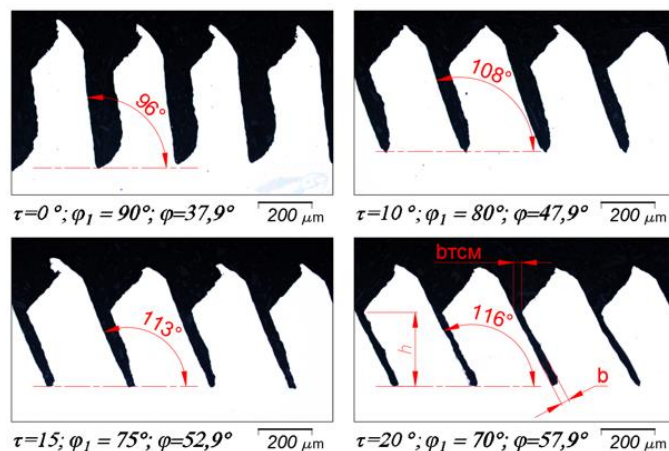
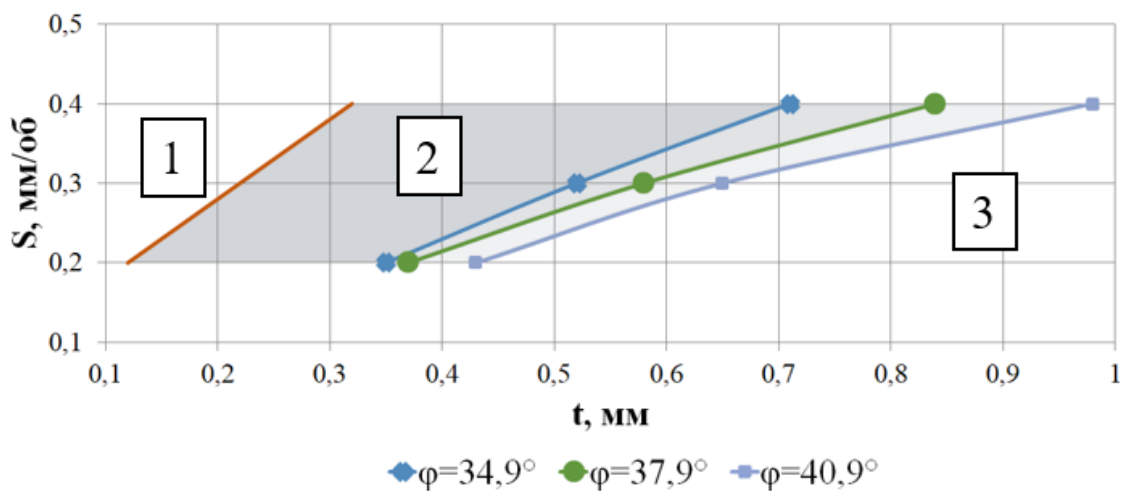


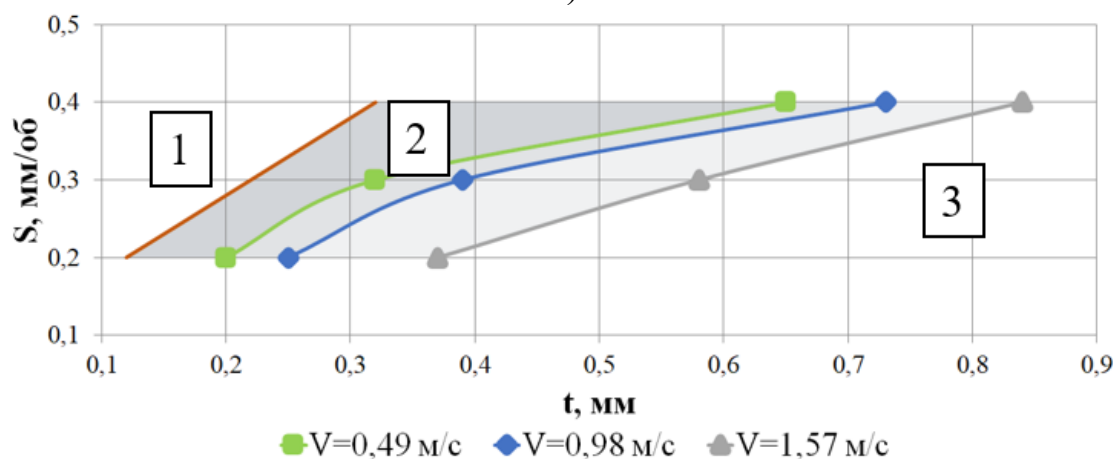
Рисунок 5. Характер изменения формы матрицы при развороте инструмента в основной плоскости

Полученные данные по определению области устойчивого ДР представлены на Рисунке 6. При эксперименте проводилось варьирование

скоростей резания и изменение главного угла в плане с сохранением остальных параметров резца.



а)



б)

Рисунок 6. Область устойчивого ДР при обработке стали 12X18H10T: а) – при варьировании главного угла в плане (ϕ) б) – при варьировании скорости резания. Выдавливание материала (1), устойчивое ДР (2), зона срыва ребра (3)

При увеличении главного угла в плане наблюдается увеличение соотношения t/S , однако при этом возрастает число отказов инструмента (разрушение при внедрении инструмента на максимальную глубину обработки). При работе инструментом, обладающим следующей геометрией заточки: $\gamma = 46,8^\circ$, $\phi = 37,9^\circ$, $\lambda = 53,8^\circ$, $\gamma_1 = -60,0^\circ$, $\alpha = \alpha_1 = 3,0^\circ$, $\phi_1 = 90,0^\circ$, разрушений резца не происходило и область существования ДР ограничивалась срывом ребра во время обработки.

Повышение скорости обработки приводит к увеличению допустимого соотношения t/S , не приводящего к срыву ребра, соответственно и расширения области устойчивого ДР. Экспериментально установлено, что при скорости резания $V = 1$ м/с достигается удовлетворительная стабильность процесса ДР при обработке стали 12X18H10T. При скорости резания $V = 0,5$ м/с наблюдалось

уменьшение соотношения t/S при котором не происходит срыва ребра (уменьшение зоны устойчивого ДР). Повышение скорости резания до $V=1,5$ м/с увеличивает зону устойчивого ДР, однако увеличение глубины резания, приводит к значительной интенсификации выделения тепла в зоне ДР и повышенному износу инструмента.

12X18H10T – метастабильная аустенитная сталь, в которой процесс деформации при обработке может вызывать мартенситное превращение из аустенитной фазы. В исходном состоянии структура этой стали характеризуется сформированными равноосными аустенитными зёрнами (Рисунок 7 – а). После обработки ДР в ребрах образовалась полосчатая структура, указывающая на образование мартенсита (Рисунок 7 – б), что было также подтверждено рентгенофазовым анализом.

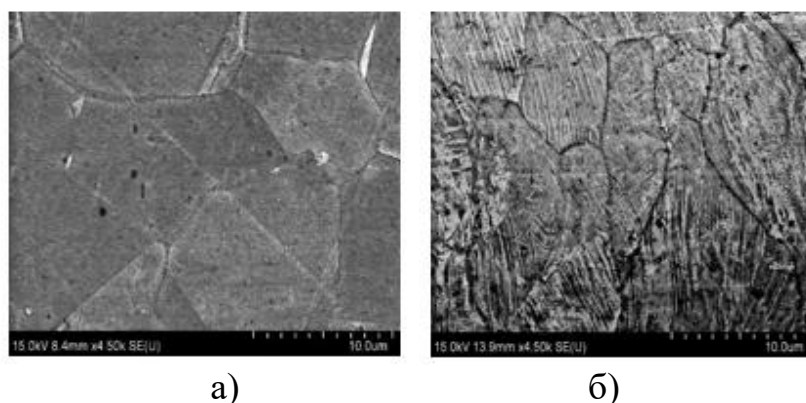


Рисунок 7. Структура стали 12X18H10T х4500: а) – в состоянии поставки; б) – после деформирующего резания

Пластическая деформация происходит по всему объему ребра, что подтверждено исследованиями микроструктуры (Рисунок 8). Микротвердость стали 12X18H10T после обработки ДР увеличилась более чем в 2 раза: на поверхности ребра микротвердость составила 415–420 HV, а по объему ребра микротвердость составила 370–380 HV, при микротвердости в состоянии поставки 170–180 HV.

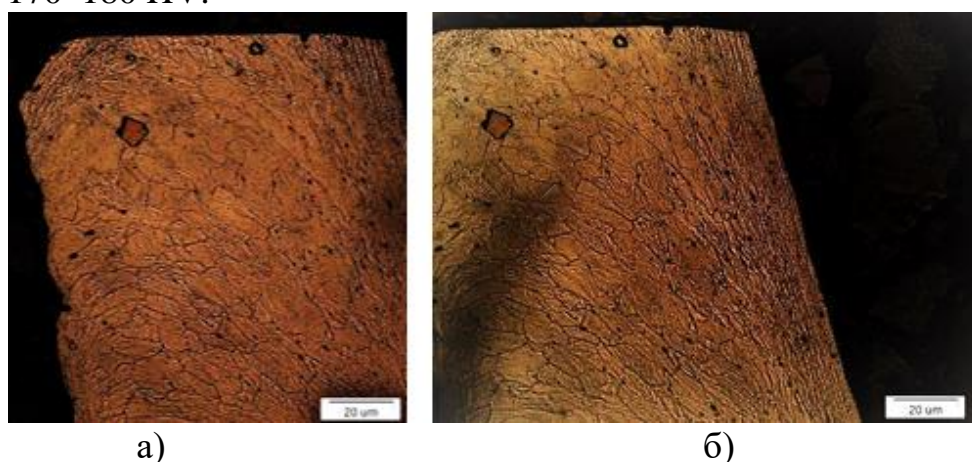


Рисунок 8. Микроструктура формируемого ребра после деформирующего резания х1000: а) – свободная сторона ребра; б) – прирезцовая сторона ребра

Деформирующее резание стали 12Х18Н10Т приводит к изменению фазового состава материала с образованием мартенсита деформации из аустенита в ребре, сопровождающееся повышением твердости по всему ребру, но не вызывающее перераспределение легирующих элементов, что подтвердило исследование методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

В четвертой главе проведен анализ методик и оборудования для триботехнических испытаний. Для оценки удельной износостойкости и коэффициента трения выбрана методика проведения испытаний по схемам трения (Рисунок 7): шар-плоскость и диск – диск для СММК, изготовленных при использовании метода ДР.

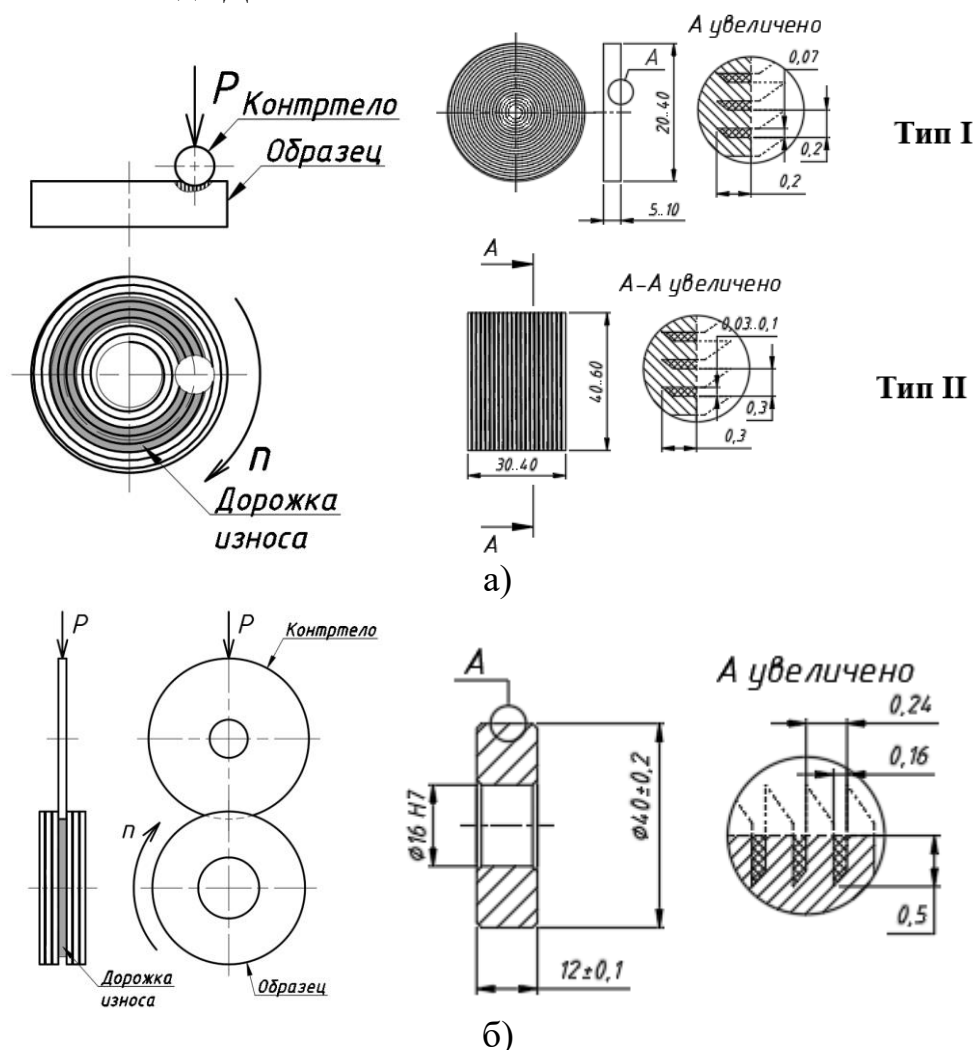


Рисунок 7. Схемы трения и эскизы образцов: а) – Шар (контртело) – плоскость (вращающийся образец), б) – Диск (контртело) – вращающийся диск (образец)

Испытания по схеме шар-плоскость (Рисунок 7 – а) проводились с различными ТСМ, матрицы образцов из стали 12Х18Н10Т изготавливались резцом со следующими параметрами: $\gamma = 46,8^\circ$, $\varphi = 37,9^\circ$, $\lambda = 53,8^\circ$, $\gamma_1 = -60,0^\circ$, $\alpha = \alpha_1 = 3,0^\circ$, $\varphi_1 = 90,0^\circ$, на режимах ДР: $S = 0,2$ мм/об и $t = 0,2$ мм, $V_{рез} = 1$ м/с. Испытания проводились без использования дополнительной жидкой смазки при постоянной нагрузке $P = 10$ Н с постоянной скоростью скольжения, в качестве

контртела использовался шар из стали ШХ15 с диаметром $d=6$ мм, и твердостью 64HRC. Результаты испытаний представлены на Рисунке 8.

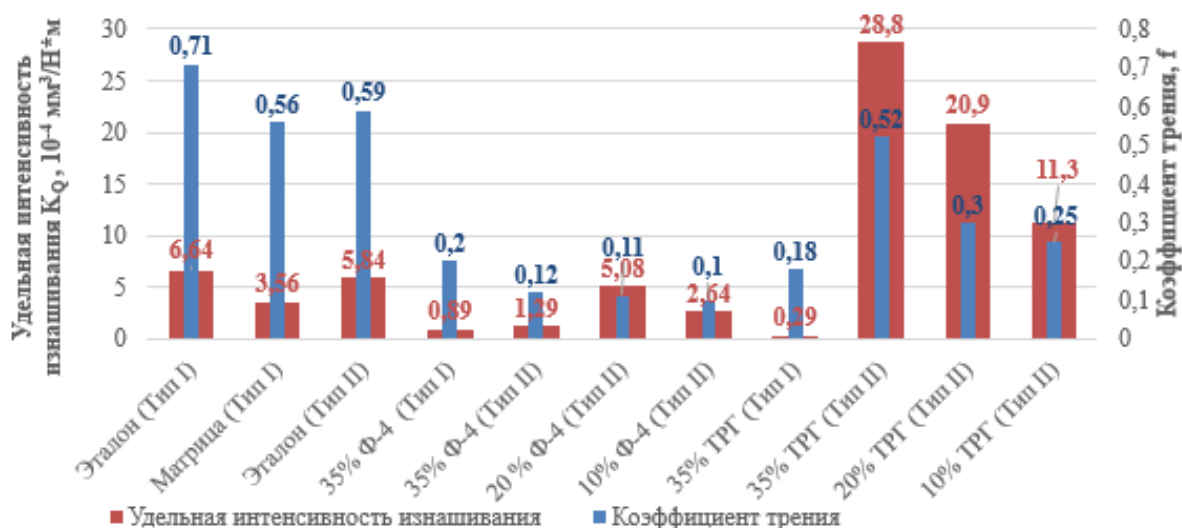


Рисунок 8. Результаты испытаний образцов по схеме шар – плоскость. Образцы Тип I испытывались при постоянной скорости скольжения $V = 1$ м/с, время испытаний образца составляло 30 мин; Образцы Тип II испытывались при постоянной скорости скольжения $V = 0,22$ м/с, время испытаний образца составляло 20 мин

Оребрение образца 12X18H10T позволило снизить удельную интенсивность изнашивания в 1,9 раз по сравнению с гладким образцом в состоянии поставки, что обусловлено повышением твердости материала ребер после обработки ДР. СММК, содержащие в своем составе ТРГ и фторопласт-4 снизили коэффициент трения в 3,9 и 3,5 (в 3 и 2,8 раз по сравнению с образцом с макрорельефом без ТСМ), а удельную интенсивность изнашивания в 22,8 и 7,4 (в 12,2 и 4 раз по сравнению с образцом с макрорельефом без ТСМ) раз по сравнению с гладким образцом в состоянии поставки.

Использование твердых смазок в структуре поверхности трения перспективно не только для незакаливаемых коррозионностойких сталей аустенитного класса. Самосмазывающиеся поверхности трения могут быть эффективно использованы и для более широкого класса сталей и сплавов, как неупрочняемых термической обработкой, так и закаливаемых материалов. Проведена проверка внедрения различных ТСМ в поверхностные матрицы на примере стали 40X после карбонитрации и закалки. Испытания образцов СММК с матрицей из 40X с различными ТСМ проводились по схеме диск-диск (Рисунок 7 – б). Матрицы образцов изготавливались резцом со следующими параметрами: $\gamma = 46,8^\circ$, $\phi = 37,9^\circ$, $\lambda = 53,8^\circ$, $\gamma_1 = -60,0^\circ$, $\alpha = \alpha_1 = 3,0^\circ$, $\phi_1 = 90,0^\circ$, на режимах резания: $S=0,4$ мм/об и $t=0,7$ мм $V_{\text{рез}}=1$ м/с, содержание ТСМ составило 32,5%. Твердость образцов перед внедрением ТСМ составила 58 HRC: карбонитрация в расплаве солей в течении 1 часа при $t=580^\circ\text{C}$. Испытания проводились без использования дополнительной смазки при постоянной

нагрузке $P=180$ Н с постоянной скоростью скольжения $v=0,4$ м/с ($n=95$ об/мин) в течение 6 часов; в качестве контртела использовался неподвижный диск из твердого сплава ВК8, шириной $l=2,1$ мм. Результаты испытаний представлены на Рисунке 9.

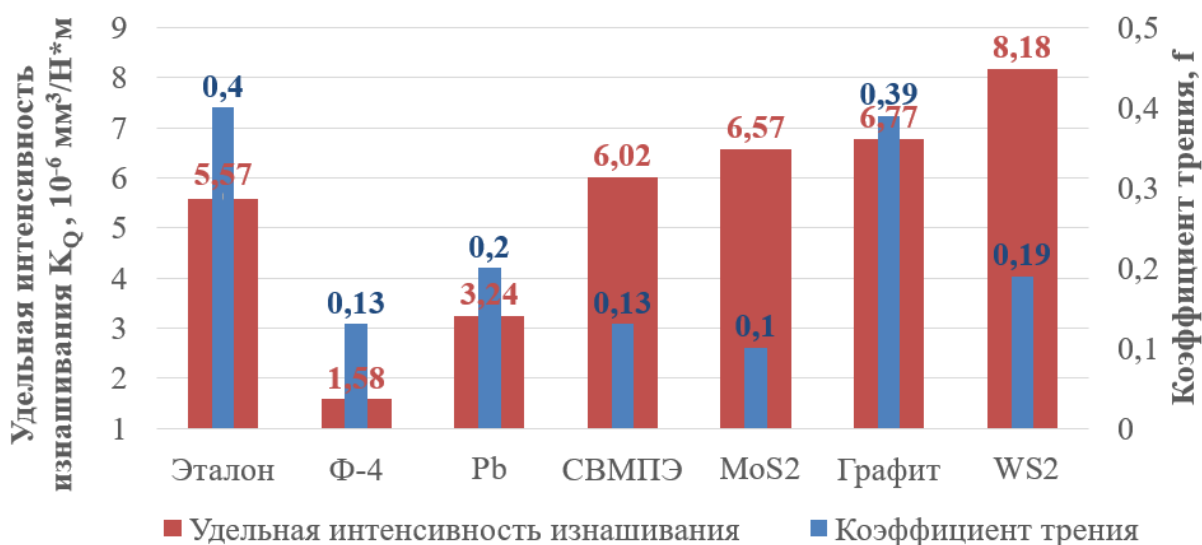


Рисунок 9. Результаты испытаний образцов по схеме диск – диск.

Внедрение фторопласта-4 в матрицу из стали 40Х позволило понизить удельную интенсивность изнашивания более чем в 3,5 раза, а коэффициент трения в 3 раза по сравнению с контрольным образцом из материала 40Х.

В пятой главе изложены технологические рекомендации по подготовке поверхности стальных заготовок методом ДР под запрессовку ТСМ содержащие: технологию заточки инструмента для ДР, основные требования к заготовкам и общие указания по реализации ДР, типовые технологические процессы обработки ДР для наружных и внутренних цилиндрических поверхностей, конических поверхностей опор шаровых пробок, торцовых поверхностей и полос. Предложен способ определения максимального усилия при запрессовке ТСМ и расчет усилия запрессовки ТРГ в матрицу из 12Х18Н10Т.

Основными требованиями, предъявляемыми к стальным заготовкам, для обеспечения устойчивого ДР являются: величина относительного удлинения при разрыве материала должна быть не менее 21%, твердость не должна превышать 220 НВ, при этом не допускается упрочнение поверхностного слоя заготовки при подготовке поверхности для последующего ДР, а именно, не допускается использование стандартных резцов со сменными многогранными пластинами, вызывающими нагартовку поверхности в связи с большим радиусом округления режущей кромки. При подготовке поверхности рекомендуется назначать величину подачи равной подаче последующего ДР.

Обработку ДР цилиндрических наружных, внутренних, торцовых поверхностей и оребрения полос на специальных оправках рекомендуется проводить на токарно-винторезных станках с ручным или программным управлением. Для обработки наружных конических поверхностей с большой конусностью использовать токарно-винторезный станок с автоматическим

приводом подачи верхней каретки или станок с ЧПУ. Оптимальная скорость резания $V=60$ м/мин. Выбор подачи S_o производится исходя из требуемого шага оребрения. Глубина резания $t = S_o$. Смазочно-охлаждающие жидкости при ДР не используются ввиду трудностей ее удаления из микрооребрения, обладающего капиллярным эффектом.

Рекомендуется использовать для заточки пластин державки типа DVJNL2525M16 (для всех поверхностей кроме внутренних цилиндрических) и державку NT-S25R-MVUNL16 для внутренних цилиндрических поверхностей. В качестве режущих пластин для заточки под геометрию резца ДР предлагается использовать: оригинальные пластины SUMITOMO VNMG 160404N-** AC830P группы P40 - для углеродистых сталей и SUMITOMO VNMG 160404N-** AC6040M группы M40 – для коррозионностойких сталей аустенитного класса.

В качестве критерия выбора минимального допустимого давления при прессовании, при котором обеспечивается полное заполнение межреберного зазора функциональным материалом выбрано условие резкого роста усилия нагрузки при прессовании (Рисунок 10, а). На Рисунке 10, б представлены образцы после запрессовки ТРГ с различными усилиями.

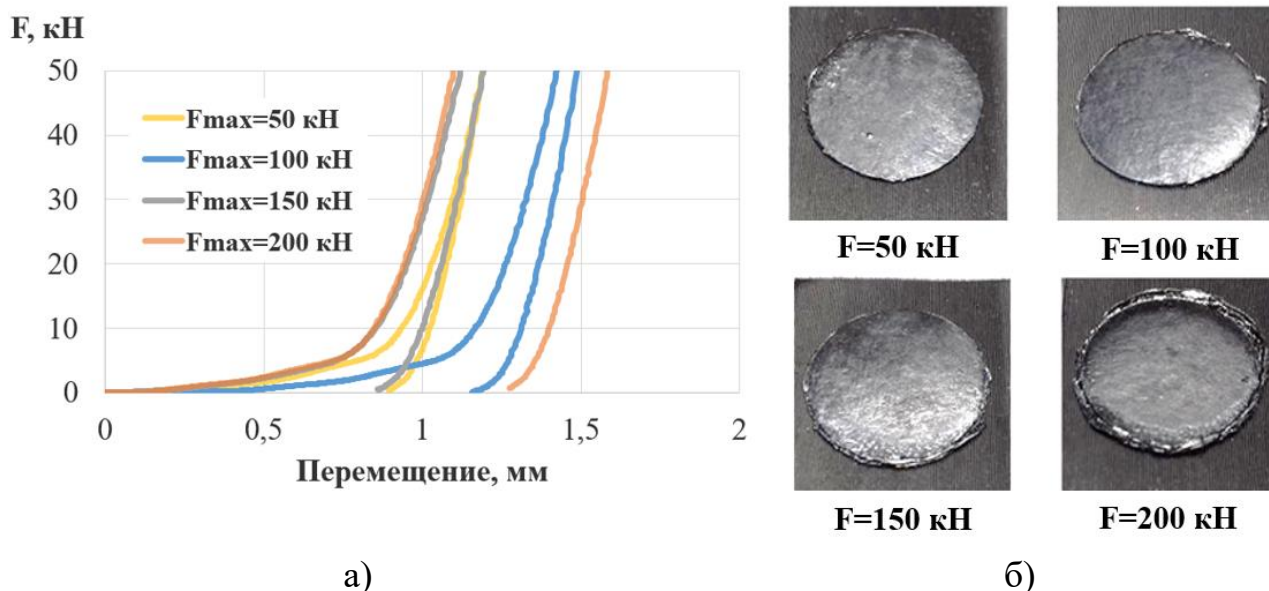


Рисунок 10. а) – диаграмма нагружения с разгрузкой б) – внешний вид образцов после запрессовки

В случае запрессовки в матрицы из стали 316L (параметры оребренной поверхности: шаг оребрения 0,3 мм, высота ребра 0,6 мм) ТРГ давление в 25,5 МПа является достаточным для полного заполнения межреберного зазора, а при достижении давления в 318,3 МПа начинается пластическая деформация ребер.

Общие выводы

1. Доказана возможность получения самосмазывающихся поверхностей трения на коррозионностойких сталях аустенитного класса введением твердых смазок в поверхностные матрицы, получаемые ДР, позволяющих повысить удельную изностостойкость до 20 раз и снизить коэффициент трения по сравнению с исходным материалом до 4-х раз.

2. Моделирование процесса ДР методом КЭ в программе AdvantEdge позволило получить достоверные модели ребер, при этом расхождение основных геометрических параметров по сравнению с экспериментальными данными не превышало 5%.

3. Установленная связь между истинной деформацией ребра и микротвердостью позволила получить информацию о распределении упрочненных зон внутри ребра в зависимости от условий обработки.

4. Определена зависимость между геометрическими параметрами режущего инструмента для ДР, режимными параметрами обработки и устойчивой областью существования ребер на коррозионностойких аустенитных сталях типа 12X18H10T.

5. Определены рациональные сочетания параметров ДР при получении поверхностных матриц для их последующего использования для внедрения ТСМ, позволяющие варьировать процентное содержание ТСМ на поверхности, так и глубину самосмазывающегося слоя.

6. Определено минимально-достаточное давление для полного заполнения межреберного зазора (при высоте ребра $h=0.6$ мм и шаге оребрения $S=0,3$ мм), и ширине межреберного зазора терморасширенным графитом, составившее 25,5 МПа.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Повышение триботехнических характеристик аустенитной стали методом деформирующего резания / Цуканов Д.В. [и др.] // *Металлург*. 2021. № 2. С. 42-47. (0,38 п.л./ 0,15 п.л.)

Версия: Improvement of Austenitic Steel Tribological Properties by Deformational Cutting / Tsukanov D.V. [et. al.] // *Metallurgist*, 2021. V. 65. №. 1-2. P. 169-176. (0,5 п.л./ 0,2 п.л.)

2. Зубков Н.Н., Васильев С.Г., Цуканов Д.В. Деформирующее резание как основа создания самосмазывающихся узлов трения скольжения // *Технология металлов*. 2021, №5. С.37-43. (0,44 п.л./ 0,1 п.л.)

Версия: Zubkov N.N., Vasil'ev S.G., Tsukanov D.V. Deformational Cutting as a Basis for Creating Self-Lubricating Sliding Friction Units // *Russian Metallurgy (Metally)*, 2021, V. 2021. №. 13. P. 1786–1791. (0,63 п.л./ 0,15 п.л.)

3. САЕ моделирование формирования оребренных структур, получаемых методом деформирующего резания / Цуканов Д.В. [и др.] // *Воронежский научно-технический вестник*. 2022. Т.2., № 2. С.3-12. (0,25 п.л./ 0,06 п.л.)

4. Tsukanov D.V., Sevalnev G.S., Zubkov N.N. Surface Modification of AISI 321 Steel by Solid Lubricants. // Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2022. P. 867-874 (0,5 п.л./ 0,3 п.л.)

5. Цуканов Д.В., Зубков Н.Н. Методика испытания самосмазывающихся поверхностей трения, полученных на основе метода деформирующего резания // Будущее машиностроения России. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. С. 98-101. (0,25 п.л./ 0,15 п.л.)

6. Цуканов Д.В., Севальнёв Г.С., Зубков Н.Н. Влияние деформирующего резания на свойства поверхности аустенитной стали // Перспективы развития металлургических технологий. М.: Издательство ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», 2020. С. 26-28. (0,19 п.л./ 0,1 п.л.)

7. Цуканов Д.В., Зубков Н.Н. Особенности деформирующего резания при подготовке поверхностей под внедрение твердосмазочных материалов // Наукоемкие технологии в машиностроении. 01–03 ноября 2023 года.: Материалы XV Международной научно-технической конференции. В 2-х томах. Москва, 2024. С. 362-364.