

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения
(наименование института полностью)

Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»
(наименование)

15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных
производств»
(код и наименование направления подготовки)

Цифровые процессы и системы автоматизированного машиностроения
(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Исследование напряженно-деформированного состояния изделий
машиностроения

Обучающийся

С.В. Чернякин

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

к.т.н., доцент, В.А. Гуляев

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2025

Содержание

Содержание.....	1
Введение	4
1 Актуальность и задачи исследования напряженно деформированного состояния	7
1.1 Актуальность исследования напряженно-деформированного состояния.....	7
1.2 Цель работы	7
1.3 Задачи работы	8
2. Литературно - аналитическое исследование напряженно деформированного состояния твердого тела при обработке его поверхностным пластическим деформированием.....	9
2.1 Поверхностное пластическое деформирование как передовой способ обработки деталей	9
2.2 Ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование.....	9
2.3 Особенности процесса поверхностного пластического деформирования	12
2.4 Классификация способов поверхностного пластического деформирования	13
2.5 Преимущества и недостатки различных видов поверхностного пластического деформирования	14
2.6 Анализ остаточных напряжений при обработке твердого тела поверхностным пластическим деформированием	17
2.7 Влияние поверхностного пластического деформирования на долговечность деталей	20
2.8 Влияние поверхностного пластического деформирования на качество деталей.	22
2.9 Температурные явления в процессе поверхностного пластического деформирования	32
2.10 Смазывающие охлаждающие технические средства для поверхностного пластического деформирования.....	38
2.11 Инструмент для поверхностного пластического деформирования	48
2.12 Анализ зарубежных источников	50
3. Разработка устройства для поверхностного пластического деформирования.	56

3.1 Особенности инструмента для поверхностного пластического деформирования с точки зрения проектирования	56
3.2 Сравнительный анализ технических решений.	65
3.3 Разработка универсального устройства для поверхностного пластического деформирования	67
4 Безопасность и экологичность объекта.....	70
4.1 Воздействие объекта на производственную сферу и окружающую среду	70
4.2 Средства и методы снижения негативного воздействия объекта.....	73
4.3 Эффективность от внедрения средств и методов защиты.....	79
Заключение	80
Список используемой литературы и используемых источников	82

Введение

В современном машиностроении для обеспечения конкурентоспособных показателей эффективности работы оборудования требуется в значительной мере уделять внимание уменьшению массы подвижных деталей [1], [2]. Данное требование обусловлено тем, что при работе узла энергия затрачивается не только на полезную работу, но и на работу по перемещению собственных деталей оборудования [3], данный фактор напрямую связан с коэффициентом полезного действия оборудования. Снижение массы деталей оборудования в нагруженных зонах приводит к уменьшению ресурса подвижных частей [4], воспринимающих нагрузку, следовательно для повышения эксплуатационных свойств необходимо более тщательное исследование деталей на предмет воспринимаемой нагрузки, с целью недопущения ослабления конструкции и снижения массы [5]. Отдельно отмечаются детали, работающие в условиях постоянного трения, а также отдельные поверхности деталей, которые в процессе эксплуатации воспринимают в большей мере нагрузки от трения [6]. В процессе работы таких деталей возникает износ не только самой детали, но и ответной детали, участвующей в работе механизма или узла [7]. Поэтому поверхности деталей, работающих в условиях трения необходимо рассматривать не только с учетом жесткости и прочности, но и рассматривать геометрию шероховатости [8]. Например, уплотнительная манжета, работающая по шейке вала, работает в условиях постоянного трения, и геометрия вала напрямую влияет на работоспособность манжеты, и способность её сохранять герметичность. Эскиз работы манжеты по валу представлен на рисунке 1

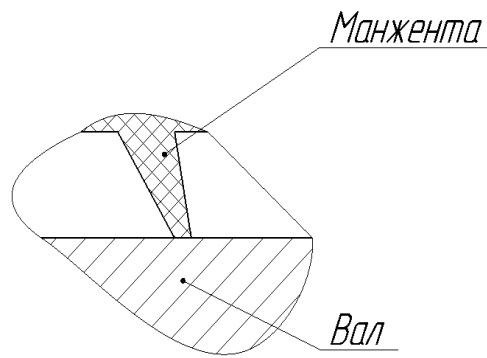


Рисунок 1 – Уплотнительная манжета, работающая по шейке вала

Поэтому требуется рассмотреть поверхность вала с точки зрения формы неровностей поверхности или, другими словами, геометрию микронеровностей. На рисунке Рисунок 2 представлен график микронеровностей (профилограмма) шейки вала с шероховатостью $Ra\ 0.63$ мкм, полученной путем обработки вала шлифованием, исходя из полученных на рисунке данных видно, что поверхность имеет острую форму микронеровностей, что будет приводить к постепенному разрушению манжетного уплотнения.

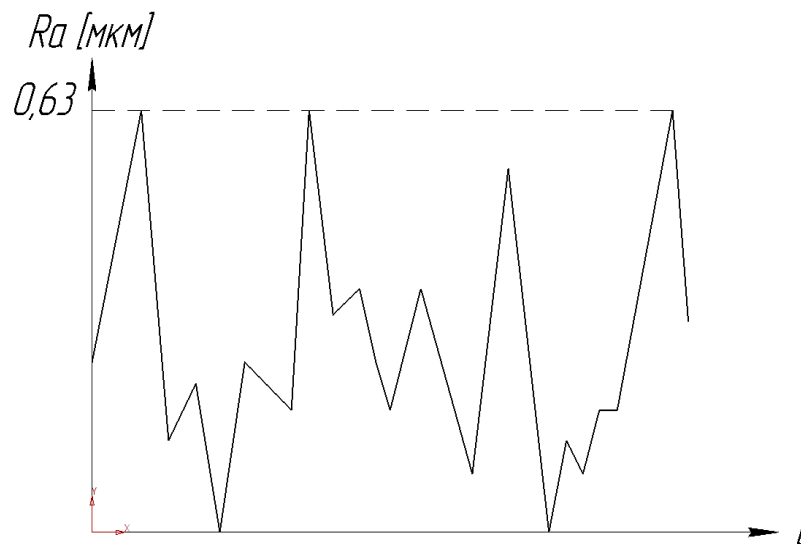


Рисунок 2 Профилограмма шероховатости шейки вала, обработанного шлифованием

На рисунке 3 представлена профилограмма шейки вала, полученной поверхностным пластическим деформированием, в частности выглаживанием

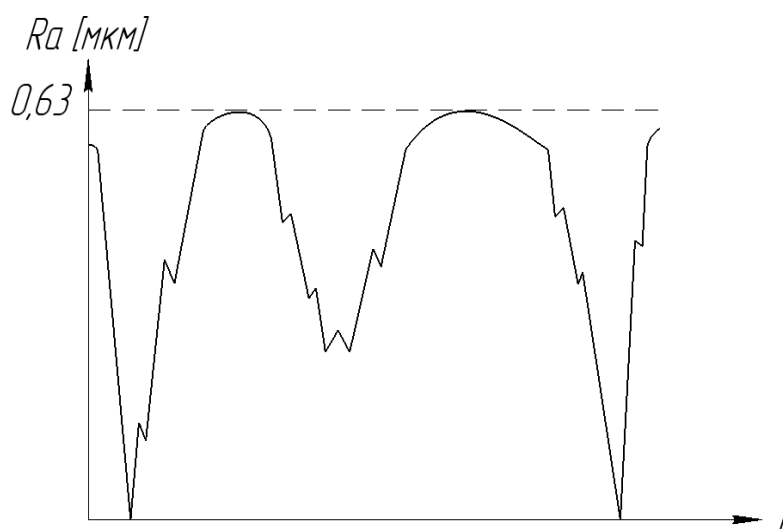


Рисунок 3 Профилограмма шероховатости шейки вала обработанного выглаживанием

По профилограмме видно, что несмотря на схожую шероховатость, форма внешних микронеровностей сглажена, а форма внутренних микронеровностей практически идентичная, что в комплексе позволит работать уплотнению шейки вала по отношению к валу с обработанного шлифованием наиболее эффективно, так как в углублениях будет скапливаться масло, препятствующее сухому трению и износу манжеты, а более гладкие внешние микронеровности по отношению к обработанной шлифованием шейке будут менее агрессивно изнашивать рабочую кромку манжеты. В комплексе вал, обработанный поверхностно пластическим деформированием, будет работать более эффективно нежели вал, обработанный шлифованием. Так же благодаря поверхностному пластическому деформированию на рабочей поверхности вала будут образованы остаточные напряжения сжатия.

1 Актуальность и задачи исследования напряженно деформированного состояния

1.1 Актуальность исследования напряженно-деформированного состояния

Исходя из описанного выше можно сделать вывод об актуальности проблемы исследования напряженно-деформированного состояния. А именно тот факт, что в деталях машиностроения важны не только геометрические размеры детали, но и способ получения готовой детали. На качество работы детали в системе так же в значительной мере влияет шероховатость рабочей поверхности, особенно это заметно на деталях, работающих в условиях постоянного трения. Для обеспечения повышения долговечности деталей в машиностроении требуется рассмотрение локального упрочнения отдельных частей детали, с обеспечением особой формы микрорельефа обработанной поверхности. Данные задачи в значительной части решает поверхностное пластическое деформирование, которое создает помимо обеспечения шероховатости – качественный микрорельеф с плавными, скругленными вершинами микронеровностей, а так же обеспечивает локальное упрочнение наиболее подверженным износу поверхностей, поэтому широкое применение поверхностного пластического деформирования в деталях машиностроения позволит заменить дорогостоящие материалы с высокой твердостью и трудной обрабатываемостью, на более доступные материалы, обладающие лучшей обрабатываемостью, что позволит достичь уменьшения себестоимости готовой детали.

1.2 Цель работы

Целью работы является исследование напряженно деформированного состояния с точки зрения процесса поверхностного пластического деформирования. Классификация основных способов поверхностного

пластического деформирования, разработка модели поверхностного пластического деформирования, анализ инструмента и устройств для поверхностного пластического деформирования.

1.3 Задачи работы

- провести литературное исследование процесса поверхностного пластического деформирования;
- определить влияния поверхностного пластического деформирования на качество работы деталей машиностроения;
- смоделировать процесс поверхностного пластического деформирования;
- определить остаточные напряжения при поверхностном пластическом деформировании;
- разработать универсальное устройство для поверхностного пластического деформирования

2. Литературно - аналитическое исследование напряженно деформированного состояния твердого тела при обработке его поверхностным пластическим деформированием

2.1 Поверхностное пластическое деформирование как передовой способ обработки деталей

В работе Н.М. Бобровского [8] описывается поверхностно-пластическое деформирование как передовой способ обработки деталей в машиностроение и не только [8]. Так же в работе Н.М. Бобровского отмечается, что, к преимуществам деталей, полученных данным методом обработки, относят [8]:

- повышенная долговечность деталей в узлах и механизмах, работающих при циклической и/или знакопеременной нагрузке благодаря образованию в наиболее нагруженных частях детали остаточных напряжений, локально упрочняющих конструкцию, так же препятствующих износу;
- повышенная долговечность в узлах и механизмах, благодаря оптимальному микрорельефу поверхности после обработки детали данным методом, в сравнении с обработкой шлифованием или точением.
- возможность уменьшения веса и габаритов в следствии повышенной локальной прочности;
- уменьшение, в некоторых случаях исключение снимаемого материала при обработке детали поверхностным деформированием;
- производительность обработки деталей поверхностным деформированием с сохранением качества поверхности;
- возможность обработки деталей без использования смазывающей охлаждающей жидкости;

2.2 Ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование

Вопросы ультразвукового поверхностного пластического деформирования в работе Н.М. Бобровского [8] отражены в качестве информационного характера и подробно не расписываются, более подробно данная тема рассматривается в работе В.Ф. Казанцева, Б.А. Кудряшова, Р.И. Нигметзянова, В.М. Приходько, Д.С. Фатюхина: «Ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование» [9], согласно источнику, инструментом является система, состоящая из преобразователя и волновода-концентратора, к торцу которого присоединяется деформирующий заготовку элемент. В процессе упрочняющей обработки инструмент прижимается к обрабатываемой поверхности. Преимуществами данного метода обработки поверхностного пластического деформирования является возможность обеспечения более жестких требований по шероховатости в купе с увеличением поверхностной твердости обработанной детали, что служит катализатором для увеличения долговечности детали в составе узла или механизма. Так же данный метод поверхностного пластического деформирования способствует увеличению плотности дислокаций в металлах, по отношению к металлам обработанным классическим видом ППД в 5 раз [9], а по отношению к недеформированным металлам разница в плотности дислокаций может достигать 20-и кратного значения [9], согласно исследованиям, плотность дислокации на прямую влияет на твёрдость поверхности [8].

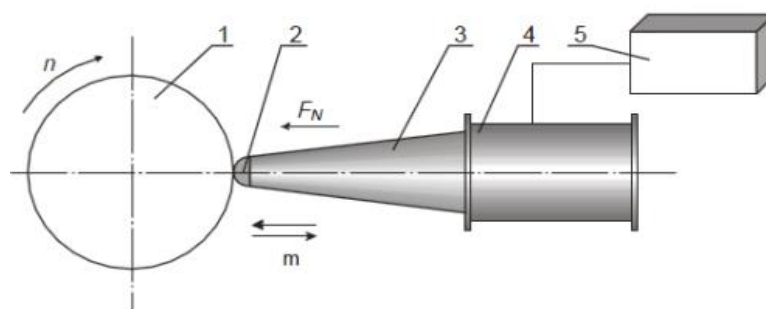


Рисунок 4 Схема ультразвукового поверхностного деформирования

На схеме ультразвукового поверхностного пластического деформирования, показанной на рисунке 24 изображено: 1 заготовка, 2 индентор, 3 волновод, 4 преобразователь, 5 генератор ультразвуковых колебаний. В работе Девойно О.Г. [7] подробно рассмотрено совмещение лазерного и ультразвукового поверхностного деформирования. В современном машиностроении обильно применяется серый чугун в основном для производства корпусных деталей [7]. В следствии неравномерной нагруженности отдельных участков детали экономически целесообразно применение лазерной обработки с оплавлением поверхности [7]. Но для обработки детали данным методом необходима лазерная установка значительной мощности [7]. Согласно источнику [7] при обработке лазером теряется исходная шероховатость заготовки, особенно заметно при увеличении глубины проплавления лазером [7]. Отмечается, что решить данную проблему возможно при помощи предварительного поверхностного пластического деформирования, а наиболее эффективный способ ППД для деталей сложных конфигураций – ультразвуковое ППД [7]. Заключение данной работы [7] является, что в процессе совмещения обработки лазером и ультразвукового ППД микрорельеф детали после обработки имеет большие радиусы скруглений микронеровностей, и отличается более низким показателем шероховатости, что в купе положительно сказывается на долговечность обработанной детали. Так же вопросом ультразвуковой обработки поверхностным пластическим деформированием задается В.И. Малышев в своей статье «Ультразвуковая отделочно-упрочняющая обработка сферическим индентором» [10]. В данной статье отмечается Отделочно-упрочняющая технология обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД) является одним из эффективных и экологически чистых методов обеспечения высоких эксплуатационных свойств деталей машин. Перспективным направлением развития и усовершенствования методов ППД является разработка комбинированных технологий с введением в зону обработки дополнительных источников энергии, в частности энергии

ультразвука. В условиях современного автоматизированного производства актуальным является применение комбинированных технологий ультразвуковой обработки на станках с числовым программным управлением [6], [3], [11]. В связи с этим важной задачей на этапе проектирования технологии является возможность прогнозируемого обеспечения требуемых показателей качества поверхностного слоя (ПС). В настоящей работе [10] представлены сравнительные результаты экспериментального исследования традиционной отделочно-упрочняющей технологии выглаживанием (ball burnishing) без наложения ультразвука и технологии ультразвукового выглаживания (УЗВ).

2.3 Особенности процесса поверхностного пластического деформирования

В работе Н.М. Бобровского [8], описывается физика процесса поверхностного деформирования. В данной работы отмечается, что не все материалы одинаково успешно обрабатываются поверхностным пластическим деформированием. В работе Н.М. Бобровского [8] дается первичное представление о материалах, пригодных для обработки методом ППД: для нормализованных и отожженных сталей с малым содержанием углерода при ППД вне зависимости от того каким способом достигнута твердость, наиболее высокие показатели усталостной прочности наблюдаются у более твердых (до обработки ППД) сталей. Так же на упрочняемость при ППД влияет структура кристаллической решетки стали, так же из учебного пособия Н.М. Бобровского «Инновационные технологии механической обработки деталей машин поверхностно пластическим деформированием» [8], выносим, что у сталей разного состава в зависимости от термообработки относительный прирост предела выносливости растет пропорционально прочностным свойствам, но только при сорбитной структуре углеродных включений, при троститной или мартенситной структуре – закономерность не проявляется [8].

Так же следует отметить важность режимов обработки, для определенной структуры материала требуется определенное усилие и скорость деформирования, для получения наибольшего прироста предела усталостной прочности.

2.4 Классификация способов поверхностного пластического деформирования

В работе Н.М. Бобровского [8] предлагается классификация способов обработки деталей методом ППД. Способы обработки деталей по работе Н.М. Бобровского [8] можно разделить на три группы:

- статические;
- динамические;
- комбинированные.

К первой группе относятся способы ППД, при которых заготовка и инструмент непрерывно взаимодействуют между собой в процессе обработки. Данный способ- наиболее распространенный на сегодняшний день, по причине относительной простоты реализации и стабильности протекания процесса, а также стойкости инструмента и достаточно высокой производительности. Данный метод позволяет получить поверхность с шероховатостью $Ra=0,32...1,0$ мкм. Так же в работе Н.М. Бобровского [8] предлагаются базовые способы увеличения производительности: Повышение производительности обработки достигают с помощью трех основных способов: повышение режимов обработки; Увеличение числа инструментов; расширение очага деформации.

Согласно работе Н.М. Бобровского [8] - ко второй группе относят вид обработки, при котором заготовка и инструмент не находятся в постоянном контакте т.е. взаимодействие заготовки и инструмента – дискретное, примером можно считать абразивную обработку деталей дробью или дробью в потоке

жидкости, так же обработку детали щетками и вибрационная обработка детали. Наиболее распространенный метод динамического ППД — это дробеструйная обработка, которая позволяет без обеспечения точного базирования детали получить упрочнение поверхности.

К третьей группе относят методы ППД, при которых на заготовку помимо инструмента ППД воздействуют инструменты разного характера [1], например при обработке через заготовку пропускается ток в месте контакта с инструментом.

2.5 Преимущества и недостатки различных видов поверхностного пластического деформирования

2.5.1 Обработка поверхностным пластическим деформированием методом обкатывания

Обкатывание метод обработки поверхностным пластическим деформированием, при котором инструмент обкатывает деталь без проскальзывания.

К преимуществам метода обкатывания относят [8]:

- простоту конструкции приспособления;
- возможность применения стандартно изготавливаемых в промышленных масштабах шариков в качестве инструмента или его части;
- возможность создания высоких контактных давлений на заготовку без применения высоких усилий;
- наиболее оптимальные условия для процесса обкатывания могут создаваться путем того, что шарики самоустанавливаются в приспособлении по отношению к заготовке.

2.5.2 Обработка поверхностным пластическим деформированием методом выглаживания

При алмазном выглаживании применяется алмазная головка с радиусом кривизны от 0,5 до 3,5 мм, припаянная с помощью серебряного припоя (температура плавления 600...650°C) [8], в данном случае коэффициент трения зависит от деформационной и адгезионной составляющей, деформационную составляющую возможно определить по приближенной формуле (1) [8].

$$f_{\text{деф}} = 0,55 \cdot \sqrt{\frac{h_b}{R}}, \quad (1)$$

Где h_b - глубина внедрения, R – радиус рабочей части инструмента.

Величина адгезионной составляющей обычно незначительна, особенно при применении смазывающей охлаждающей жидкости (0,01...0,05), но существуют случаи, когда адгезионная составляющая настолько велика, что частички заготовки прилипают к инструменту, например для титана вследствие этого алмазное выглаживание является неэффективным [8]. Более подробно сновные недостатки алмазного выглаживания отражены в научной статье В.Н. Ковальганова : «Алмазное выглаживание с малым силовым воздействием на обрабатываемую поверхность» [12], а именно: сравнительно низкая производительность обработки из-за чувствительности алмазного инструмента к температурным воздействиям, вследствие чего необходимо ограничивать усилие воздействия инструмента на заготовку и/или понижать скорость обработки, в противном случае будет наблюдаться ускоренный износ дорогостоящего алмазного инструмента [12].

На сегодняшний день, основным недостатком статического ППД считается низкая скорость обработки и высокие требования к заготовке [13], так как за редким исключением ни у одного из основных мировых

производителей нет доступного инструмента для проведения выглаживания на высоких режимах [13]. Одним из основных преимуществ же – является возможность изменения геометрии заготовки без использования СОТС [13], что благоприятно сказывается на экологичности технологического процесса [13]. Так же в работе Ежелева А.В. [13] представляется такой положительный фактор как возможность изменения геометрии заготовки без снятия материала [13], что так же положительно сказывается на экологичности процесса обработки [13]. Выглаживание является одним из основных способов поверхностного пластического деформирования, поэтому необходимо подробнее изучить данную тему. Например, в статье В.Н. Ковальганова [14], в которой отмечается, что наиболее эффективный технологически процесс должен одновременно воздействовать на заготовку как силовым, так и тепловым способом взаимодействия, или каким-либо иным способом. Так же отмечается уже знакомые тезисы повышения долговечности деталей в машиностроении, такие как качество трущихся, и наиболее нагруженных поверхностей.

2.5.3 Дробеструйная обработка

Способ обработки поверхностным пластическим деформированием, с помощью дроби, которая на большой скорости ударяется о обрабатываемую деталь [15], в результате чего поверхность детали подвергается поверхностному пластическому деформированию. В зависимости от размеров дроби и скорости её соударения с деталью отличается величина поверхностного пластического деформирования, а также полученная в результате обработки шероховатость [15].

Основным преимуществом данного метода поверхностного пластического деформирования является возможность обработки сложных поверхностей деталей, а также отсутствие требования по позиционированию детали относительно инструмента (в данном случае струя дроби). Так же стоит

отметить, что данный метод поверхностного пластического деформирования является высокопроизводительным, это обеспечивается благодаря тому, что при обработке деталь и инструмент взаимодействуют не в одной точке, а в зоне распространения струи [15], [4].

Данный метод имеет значительный недостаток, связанный с применением его для обработки ответственных деталей, он связан с остатками дроби на поверхности деталей, которые не удаляются обычной мойкой, следствием чего становится попадание абразивных частиц в пары трения. Очистка ответственных деталей, обработанных поверхностным пластическим деформированием методом выглаживания требует более сложных подходов, нежели при очистке деталей, обработанных обкатыванием или выглаживанием, что ведет к дополнительным затратам на оборудование [16].

2.6 Анализ остаточных напряжений при обработке твердого тела поверхностным пластическим деформированием

На рисунке 4 представлен график растяжения конструкционной стали, используя его возможно рассчитать остаточные напряжения при обработке поверхностным пластическим деформированием методом выглаживания

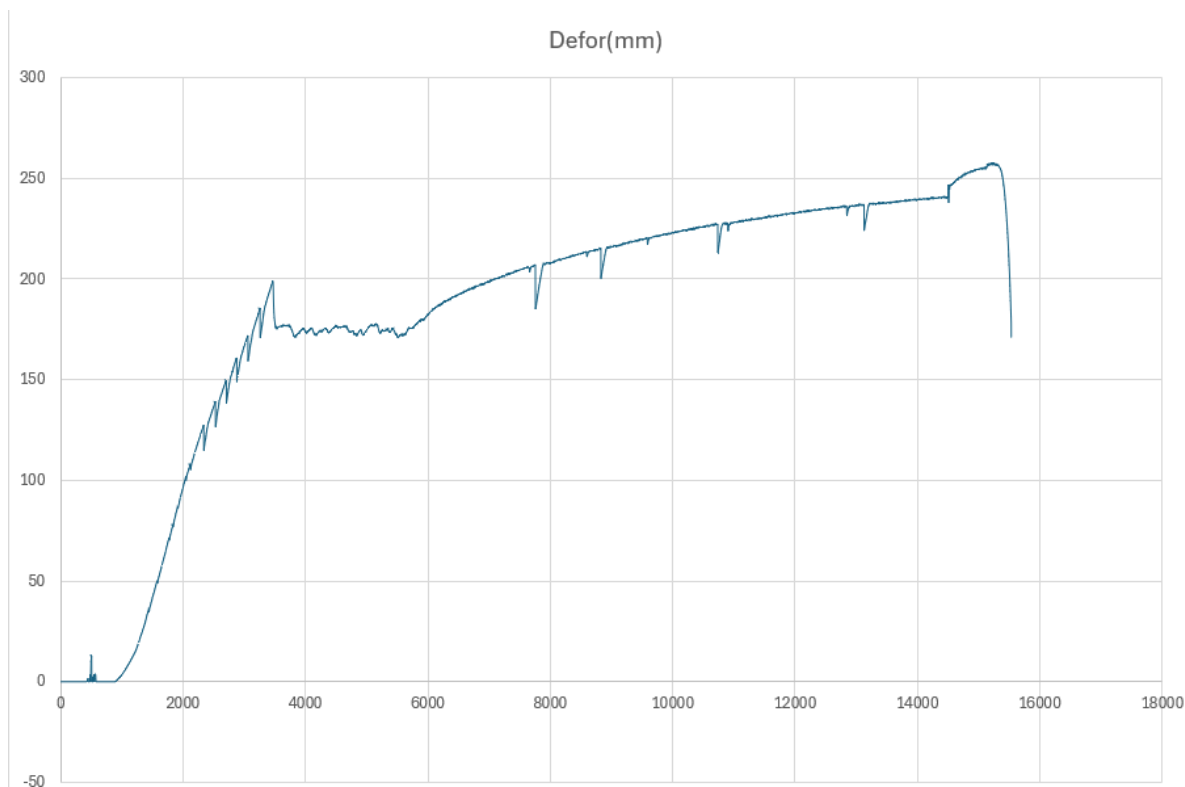


Рисунок 5 - График растяжения конструкционной стали

Для этого построим модель процесса обработки поверхностным пластическим деформированием. Эскиз обработки представлен на рисунке 5. В данном случае представлен эскиз обработки в поперечном сечении. В качестве исходных данных принимается график растяжения для конструкционной стали, представленный на рисунке Рисунок 5, усилие поверхностного пластического деформирования 200 Н, диаметр деформирующего шарика 1 мм, диаметр вала много больше чем диаметр шарика.



Рисунок 6 - Эскиз обработки вала поверхностным пластическим деформированием

Для оптимизации расчета будет решаться плоская (2D) модель процесса. Результаты расчета, представленные на рисунке 6 показывают, что на поверхности детали образуются остаточные напряжения, величиной 215 Мпа. Исходя из сказанного выше можно сказать, что эксплуатационные свойства деталей в машиностроение во многом зависят от технологии получения детали особенно при работе в условиях повышенного трения и высокотемпературных режимах, поверхностное пластическое деформирование дает значимы прирост долговечности детали [5]. Современные экономические условия ставят перед технологией свои задачи и диктуют определённые ограничения. К задачам относят повышение производительности и снижение затрат на производство.

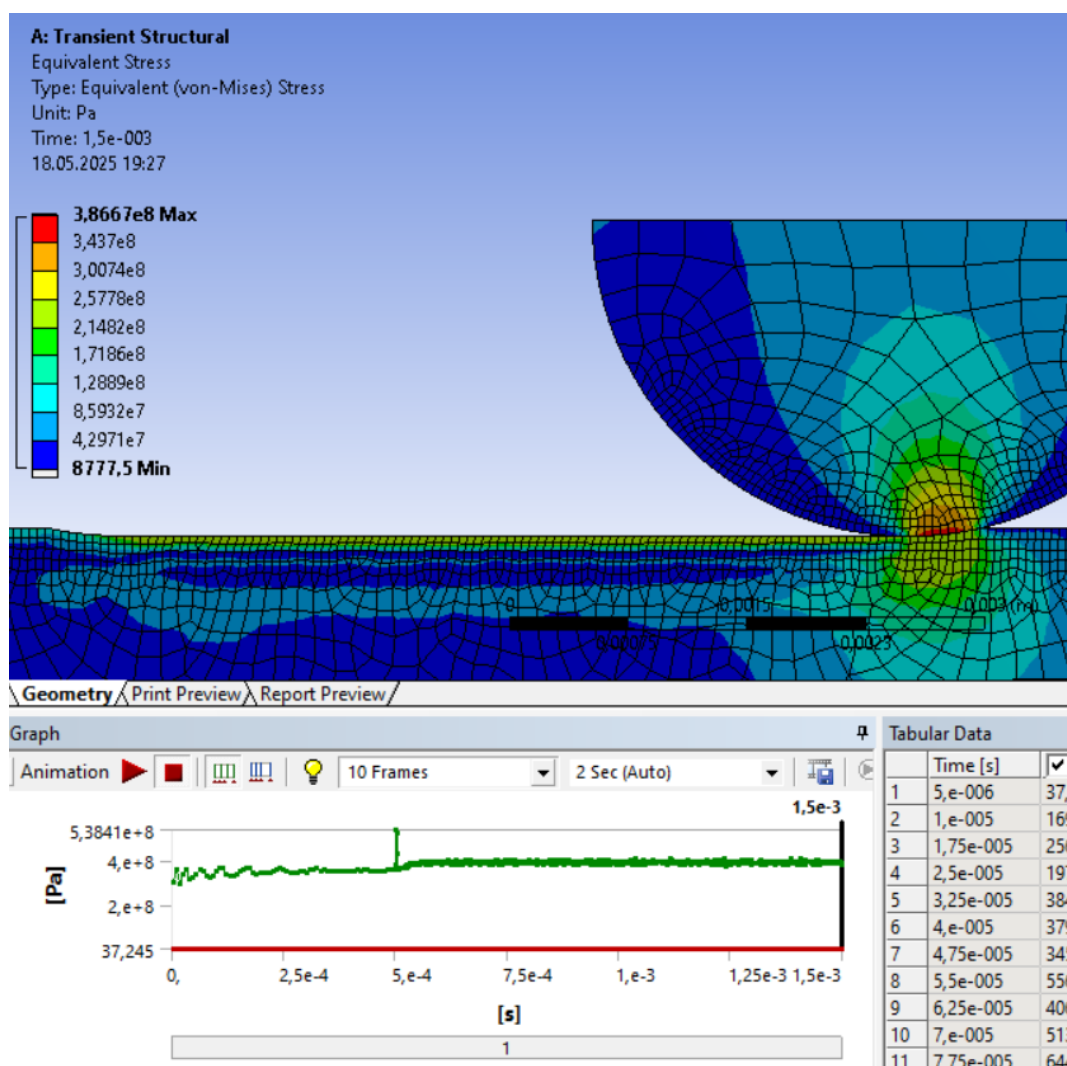


Рисунок 7 - Остаточные напряжения.

К ограничениям относят ограничение на использование при производстве различных химических веществ, загрязняющих окружающую среду, а также минимизацию участия человека в процессе получения детали.

2.7 Влияние поверхностного пластического деформирования на долговечность деталей

В работе Н.М. Бобровского [8] отражено влияние способа обработки деталей на долговечность: выигрыш по долговечности детали, обработанной методом ППД в аналогичных условиях эксплуатации достигает 93% (для

поршневого пальца). Так же в работе Н.М. Бобровского даются кривые упрочнения различных сталей, которые показаны на рисунке 1. Данные кривые показывают степень упрочнения для различных сталей

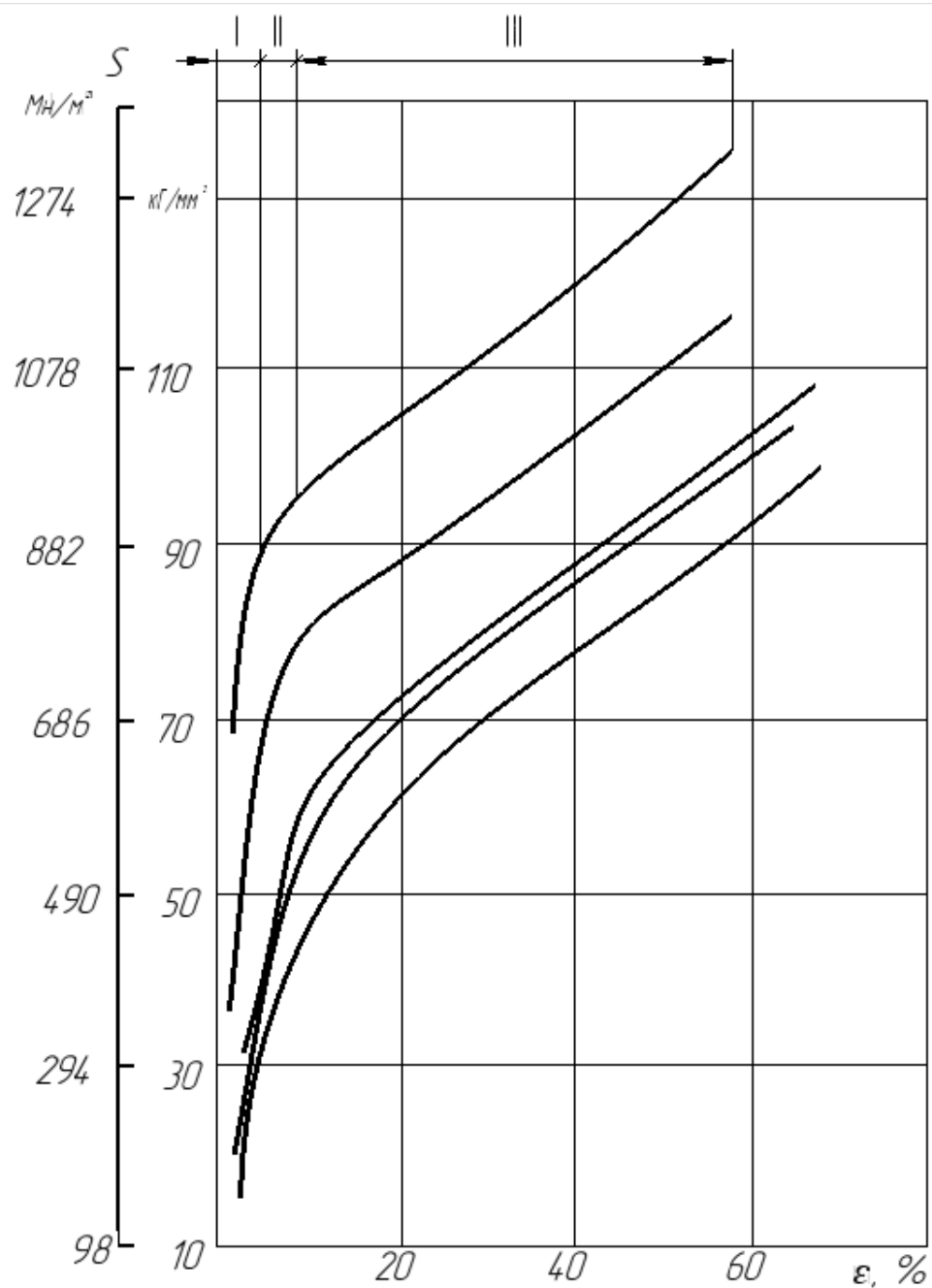


Рисунок 8 - Кривые упрочнения при сжатии для термически обработанных сталей.

На рисунке 8 показаны следующие кривые :1. Сталь 40 после отжига; 2. Сталь У7 после отжига; 3. Сталь 40 после нормализации; 4. Саль 40 после улучшения (отпуск при 600°C); сталь 40 после улучшения (отпуск при 500°C). Н.М. Бобровский в своей работе [1] описывает базовые ограничения при обработке ППД, например Кривая напряжение-деформация металла является конечной так как при росте напряжений до определенных значений в образце неизбежно появляются трещины, приводящие к разрушению образца. Так же в работе [8] отмечается важность режимов обработки ППД, а именно нагрузка, время ее приложения и температура нагрева образца. В работе Ежелева А.В. [13] описан эксперимент, в результате которого, благодаря изменению финишной операции «полировка», алмазным выглаживанием, было получено уменьшение износа деталей двигателя (поршневых пальцев) от 60 до 93% в зависимости от образца. Так же рассмотрен важный аспект того, что работы по изготовлению образцов производились на экспериментальном оборудовании, и имели высокую степень зависимости от человеческого фактора, что косвенно говорит о том, что при серийном применении в состоянии отлаженного процесса показатель увеличения надежности может стабильно достигать 70-85% [13].

2.8 Влияние поверхностного пластического деформирования на качество деталей.

Под качеством поверхности воспринимается не только шероховатость, но и механические характеристики поверхностного слоя, которые эффективно повышаются методом поверхностного пластического деформирования. Автор приводит исследования, направленные на изучение силовых воздействий при выглаживании, анализ которых показывает снижение на 15-20% силовой напряжённости алмазного выглаживания благодаря предварительной релаксации остаточных напряжений в заготовке. Автор в своей работе выявил рациональные параметры ультразвуковых колебаний, сообщаемых заготовке для релаксации напряжений и режима ультразвуковой релаксации с целью

повышения эффективности процесса, данные автор представляет на графике, который представлен на рисунках Рисунок 9, 9.

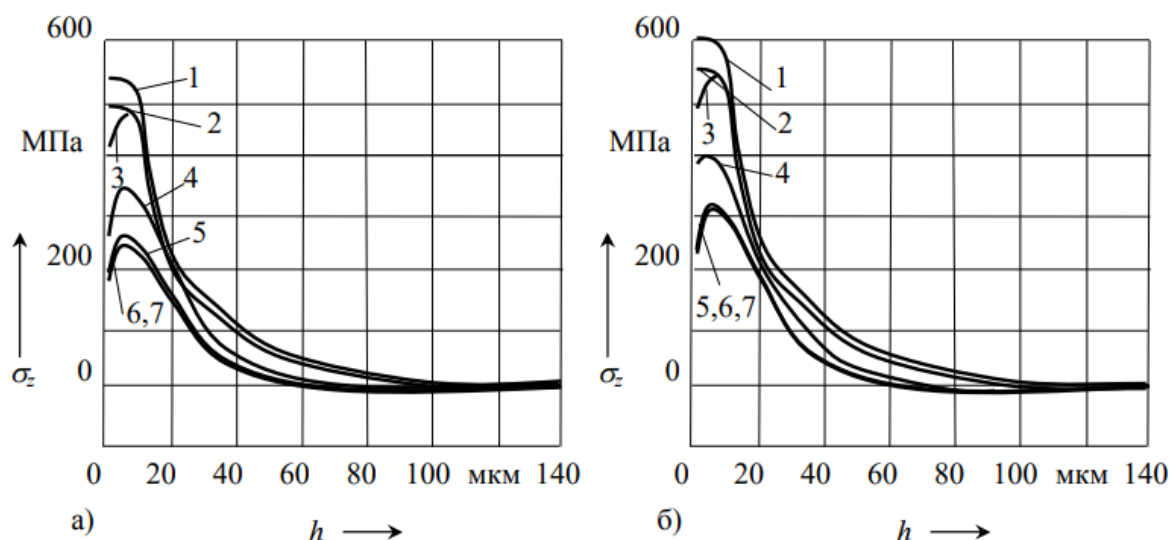


Рисунок 9 - Влияние времени релаксации и усилия прижима волновода на распределение технологических остаточных напряжений σ_z в поверхностном слое заготовок из сталей 3Х3М3Ф и 95Х18

На рисунке под цифрами обозначены следующие данные: 1 – после шлифования; 2, 3 – после ультразвуковой релаксации в течение 1 мин, под буквами: а) – для стали 3Х3М3МФ, б) – для стали 95Х18.

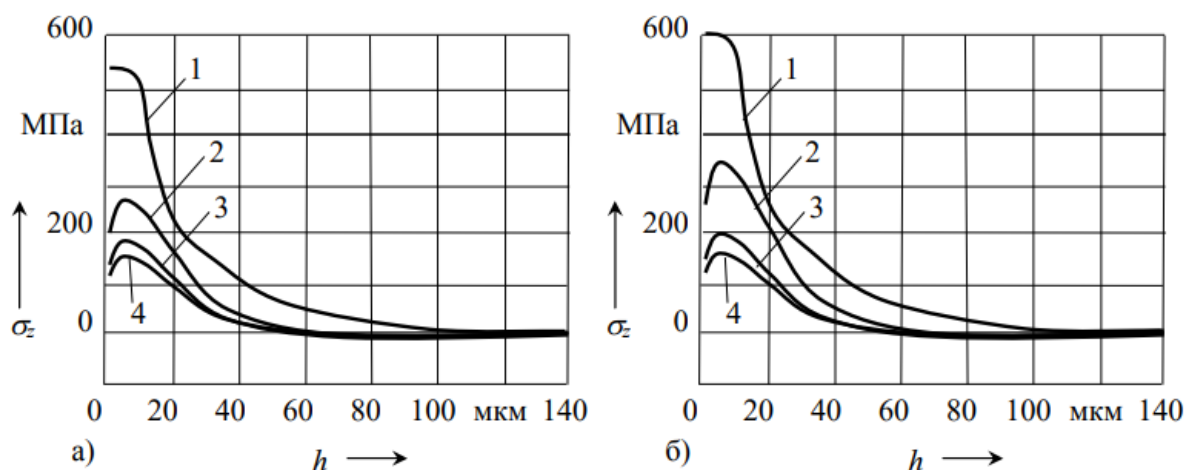


Рисунок 10 - Влияние формы ультразвуковых колебаний на распределение технологических остаточных напряжений σ_z в поверхностном слое заготовок из сталей 3Х3М3Ф и 95Х18

На рисунке 9 представлены следующие графики под цифрами 1 – после шлифования; 2 – после шлифования и ультразвуковой релаксации остаточных напряжений, под буквами: а) – для стали 3Х3М3МФ, б) – для стали 95Х18.

Так же следует отметить, что вопрос процессов выглаживания поднимался еще в СССР, в исследованиях того времени были отражены основы выглаживания, а также представлены различного рода интересные решения, касающиеся инструмента для поверхностного пластического деформирования [17]. Пример устройства показан на рисунке 11.

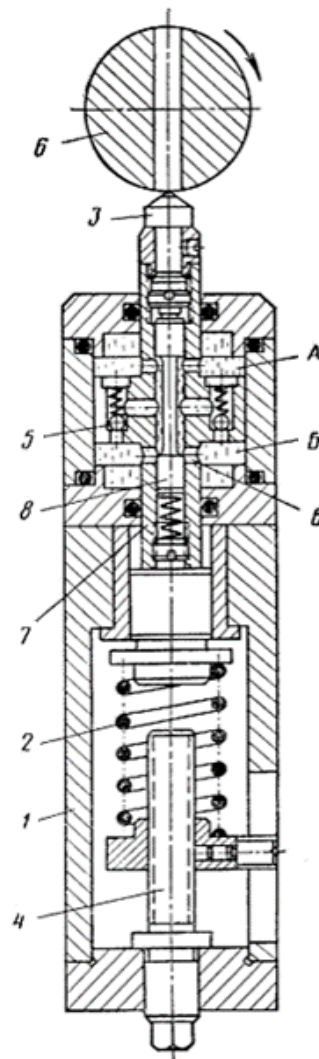


Рисунок 11 - инструмент для алмазного выглаживания поверхностей детали вращения

Данный инструмент интересен тем, что имея достаточно простую, по современным меркам, конструкцию имеет механизм выравнивания усилия воздействия на заготовку, в данном случае это гидравлический демпфер, что позволяет работать этим инструментом с прерывистыми поверхностями, не опасаясь поломок инструмента, а также данное решение снижает требования к заготовке и применяемому оборудованию при этом не теряя в качестве полученного результата. В статье Полетаева В.А., [18] отмечается важность повышения качества изготовления различного рода агрегатов, и в том числе насосов, отмечается, что частой причиной износа и выхода из строя

гидронасосов является выход из строя таких компонентов насоса как валы и втулки, так как эти детали в данном случае наиболее нагружены. В конструкции насосов применяются стали 40Х13 и 12Х18Н10Т, или их аналоги, это дорогостоящие стали, обладающие стойкостью к коррозии, качество поверхностей этих сталей нельзя (или очень сложно) увеличить за счет легирования или термообработки. Автор предлагает изменить материал на сталь 45, что позволит снизить стоимость материала, и применить комбинированную систему упрочнения.

Автор так же приводит схему экспериментальной установки, которая показана на рисунке 12.

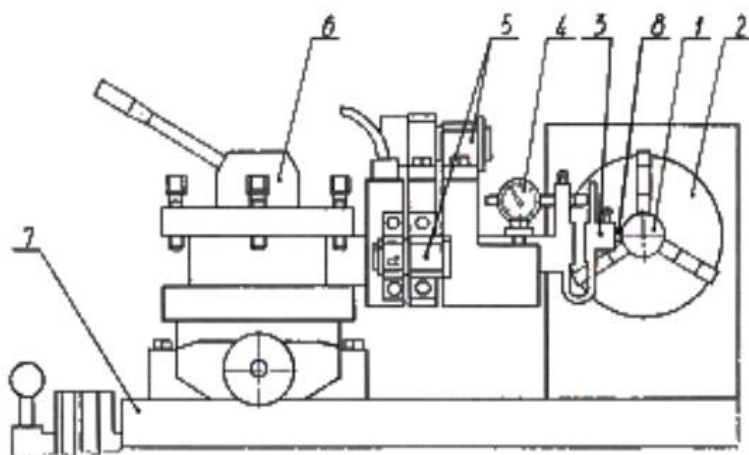


Рисунок 12 - Схема экспериментальной установки.

На рисунке 11 показаны следующие позиции: 1 – образец; 2 – шпиндель станка; 3 – динамометр; 4 – стрелочный индикатор; 5 – державку; 6 – резцедержатель станка; 7 – салазки; 8 – контролер. Так же автор в свое работе показывает результаты критического числа N циклов износа деталей в зависимости от метода упрочняющей обработки (см. рис. 12-14)

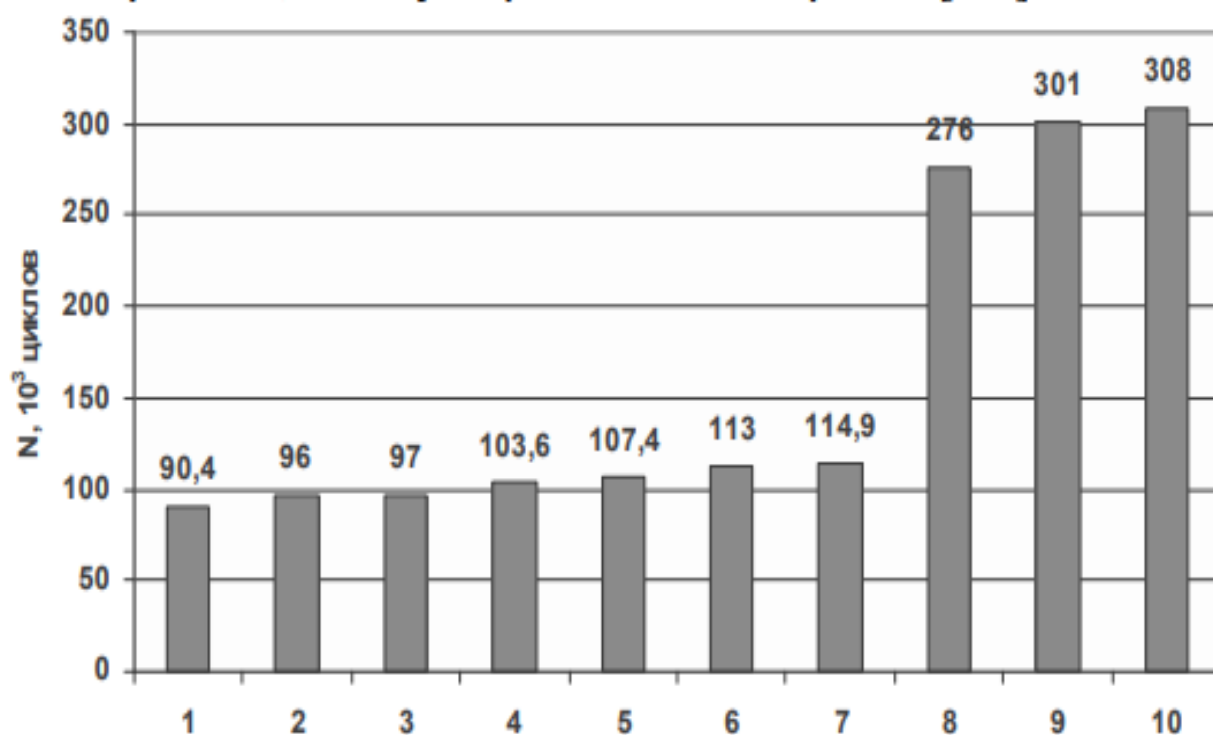


Рисунок 13 - Влияние метода упрочнения на износ поверхности детали из стали 45

На рисунке 13 показаны следующие данные: 1 – (исходная) точение; 2 – точение плюс алмазное шлифование; 3 – точение плюс алмазное шлифование плюс магнито-импульсная обработка; 4 – термическая обработка; 5 – термическая обработка плюс магнито-импульсная обработка; 6 – термическая обработка плюс алмазное шлифование; 7 – термическая обработка плюс алмазное шлифование плюс магнито-импульсная обработка; 8 – ультраалмазное покрытие; 9 – ультраалмазное покрытие плюс алмазное шлифование; 10 – ультраалмазное покрытие плюс алмазное шлифование плюс магнито-импульсная обработка

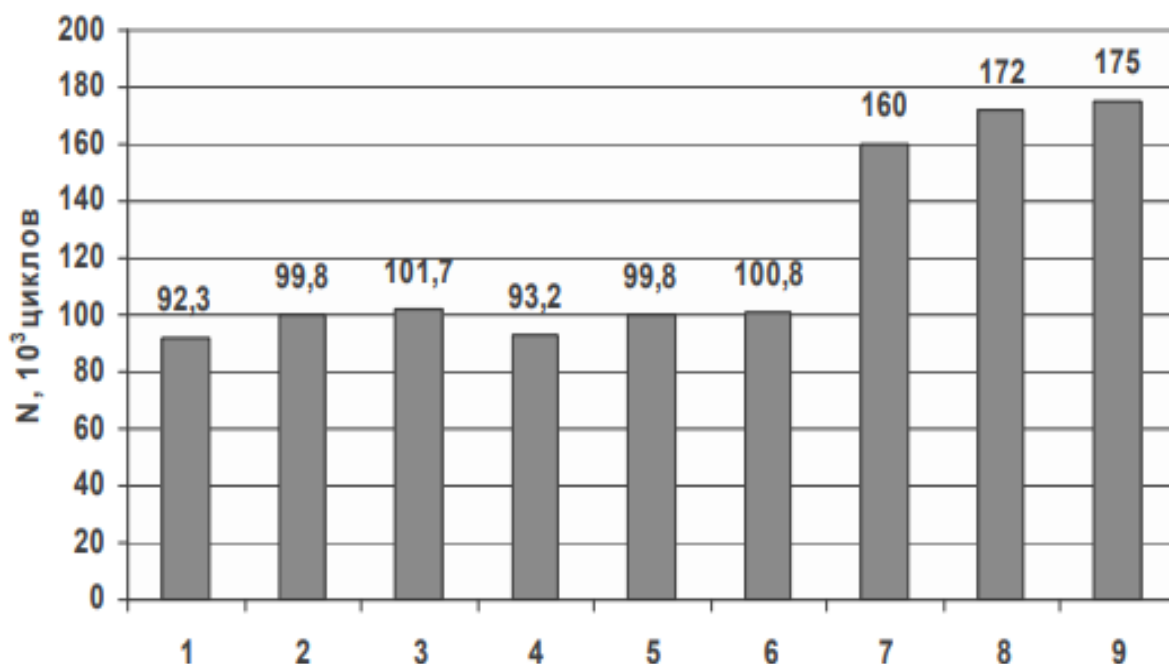


Рисунок 14 – Влияние метода упрочнения на износ поверхности детали из стали 12X18H10T

На рисунке 14 представлены следующие данные: 1 – точение; 2 – точение плюс алмазное выравнивание; 3 – точение плюс алмазное выравнивание плюс магнито-импульсная обработка; 4 – шлифование; 5 – шлифование плюс алмазное выравнивание; 6 – алмазное выравнивание плюс магнито-импульсная обработка; 7 – термическая обработка; 8 – термическая обработка плюс алмазное выравнивание; 9 – термическая обработка плюс алмазное выравнивание плюс магнито-импульсная обработка

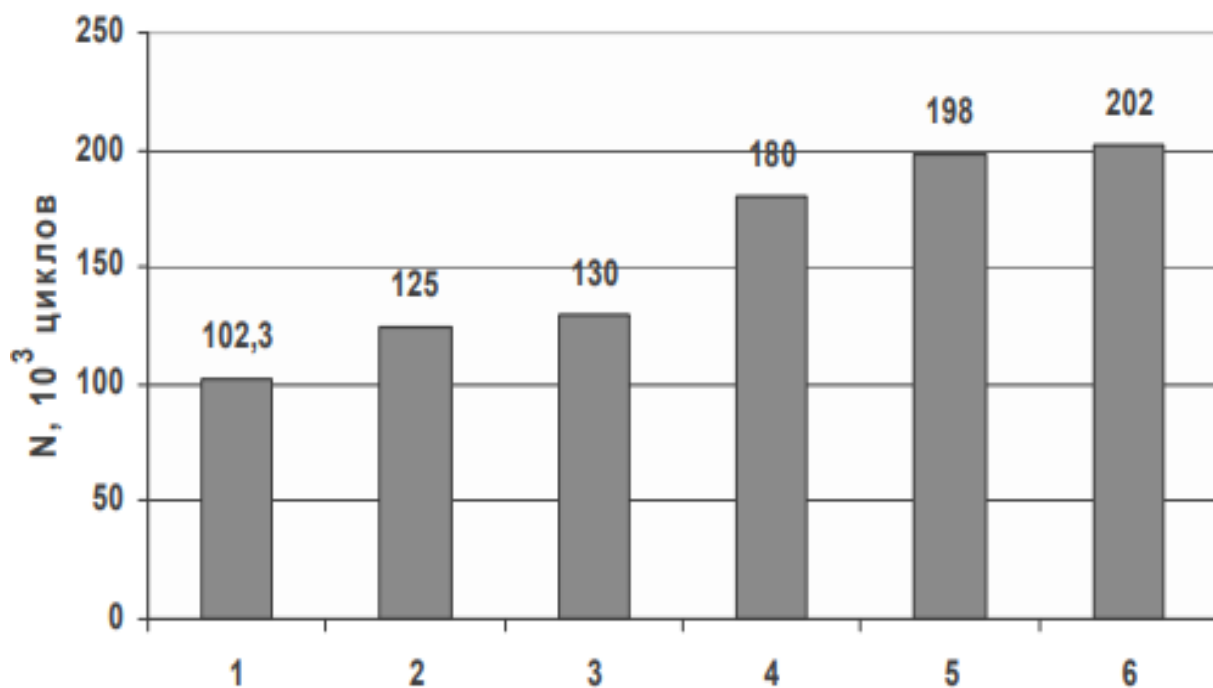


Рисунок 15 – Влияние метода упрочнения на износ поверхности детали из стали 40X13

На рисунке 15 представлены следующие данные 1 – точение; 2 – точение плюс алмазное шлифование; 3 – алмазное шлифование плюс магнито-импульсная обработка; 4 – термическая обработка; 5 – термическая обработка плюс алмазное шлифование; 6 – термическая обработка плюс алмазное шлифование плюс магнито-импульсная обработка

Так же автор приводит микрорельефы поверхности детали после обработки и после износа которые показаны на рисунка 16 – 20

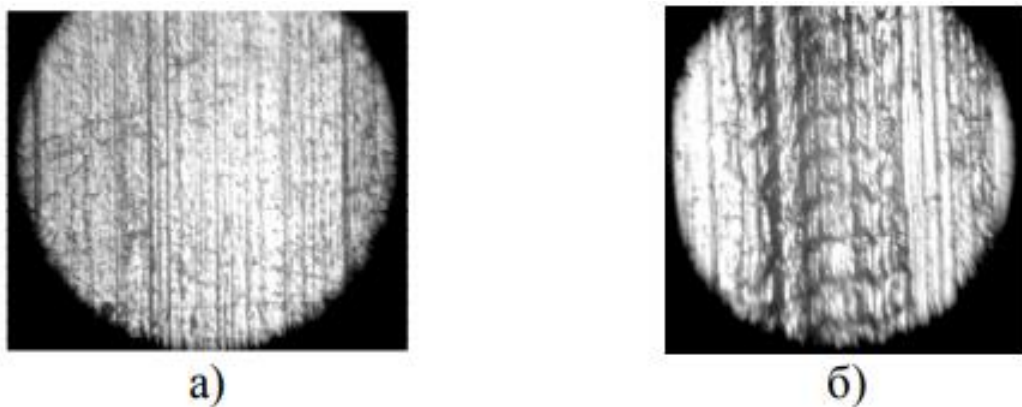


Рисунок 16 – Микрофотографии износа поверхности детали из стали 45

На рисунке 16 представлены следующие фотографии: а) – исходное после точения и последующего алмазного выглаживания; б) – после износа

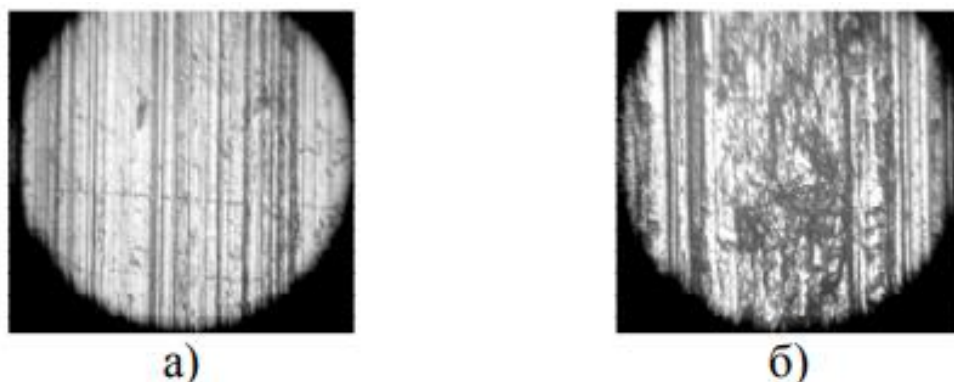
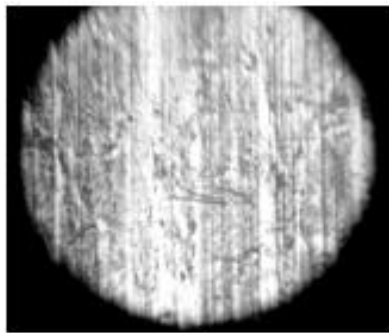


Рисунок 17 – Микрофотографии износа поверхности детали из стали 12X18H10T

На рисунке 17 представлены следующие снимки: а) – исходное после точения и последующего алмазного выглаживания; б) – после износа



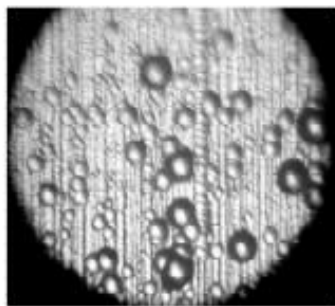
а)



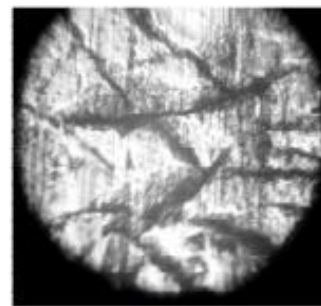
б)

Рисунок 18 – Микрофотографии износа поверхности детали из стали 40X13

На рисунке 18 представлены следующие снимки: а – исходное после точения и последующего алмазного выравнивания; б – после износа.



а)



б)

Рисунок 19 – Микрофотографии износа поверхности детали из стали 45

На рисунке 19 приставлены следующие снимки: а) – исходное после гальванопокрытия из хрома с ультраалмазами; б) – после износа.

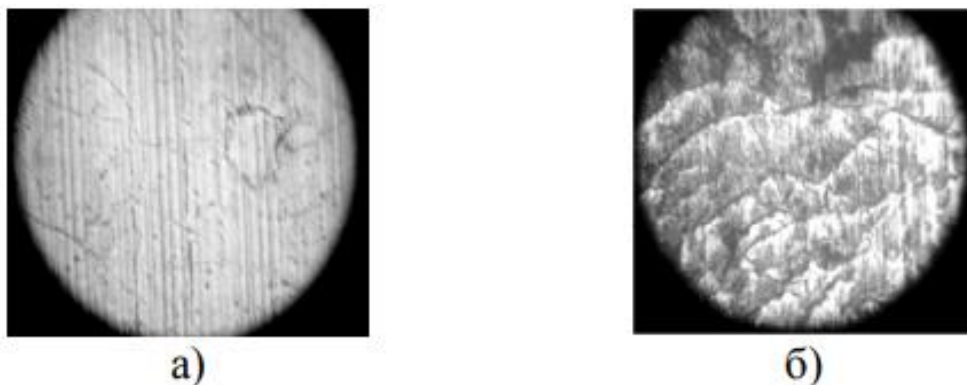


Рисунок 20 – Микрофотографии износа поверхности детали из стали 45

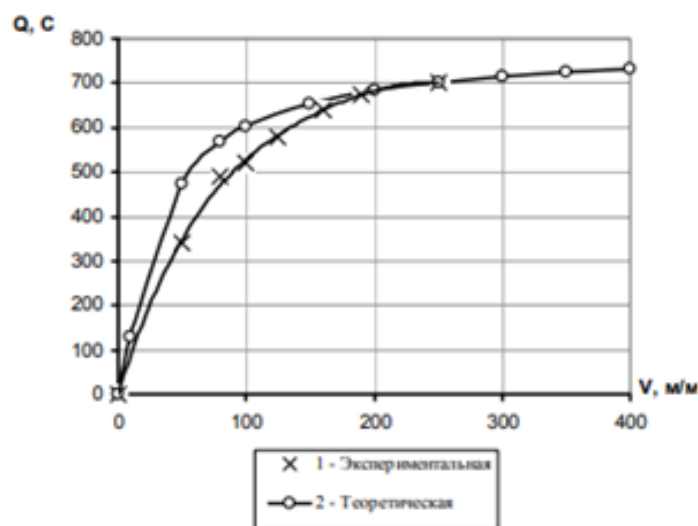
На рисунке 20 представлены следующие снимки: а) – исходное после гальванопокрытия из хрома с ультраалмазами и последующего алмазного выглаживания; б) – после износа.

Анализ фотографий изнашивания сталей 45, 12Х18Н10Т, 40Х13 упрочненных различными способами, показывает, что характер такого изнашивания свойственен всем исследуемым видам упрочнения. Отличительной особенностью является только время (количество циклов) изнашивания, которое в большей мере определяется начальными условиями процесса изнашивания. Обработка импульсным магнитным полем также увеличивает количество циклов изнашивания за счет изменения физико-механических свойств исходного материала. В заключении автор приводит результат исследования: обработка алмазным выглаживанием позволяет без ущерба для ресурса оборудования заменить дорогостоящую сталь 40Х13 на менее дорогую сталь 45.

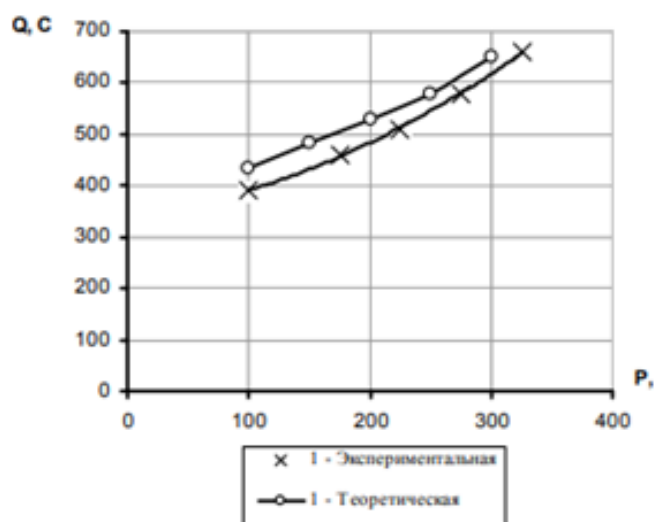
2.9 Температурные явления в процессе поверхностного пластического деформирования

Отдельное внимание стоит уделить температурным явлениям в процессе алмазного выглаживания, данный вопрос поднимается в статье Тихонова Д. А.

Температурное поле при алмазном выравнивании быстрорежущей стали с титано-нитридным покрытием [19] . В данной статье рассматривается исследование температурного поля вокруг процесса алмазного выравнивания труднообрабатываемого материала, такого как быстрорежущую сталь с титано-нитридным покрытием, так же приводится оценка адекватности полученной математической модели в результате исследования. Проведенные исследования позволили определить величину максимальных контактных температур и характер их изменения в зависимости от скорости обработки и радиальной силы, а также определить область допустимых режимов обработки. Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных данных показан на рис. 20. При этом доверительный интервал экспериментального определения температур составил $\pm 20^{\circ}\text{C}$ с надежностью $P=0,95$.



а)



б)

Рисунок 21 – Зависимость максимальной температуры в контакте при отделочно-упрочняющей обработке быстрорежущей стали с TiN алмазным выглаживанием

Сравнение результатов экспериментов, показанное на рисунке 21 под буквами: а)– от скорости главного движения V : 1) экспериментальная кривая ($P=175\text{Н}$; $S=0,05\text{мм/об}$; $R=1\text{мм}$) 2) теоретическая кривая с расчетными температурами показало, что максимальное отличие аналитически полученных данных составляет 15% в области низких температур и скоростей порядка 40-90 м/мин. Наименьшая же разница полученных результатов

составляет не более 5% в области скоростей свыше 120 м/мин, наиболее применимых в практике ППД. Следует отметить хорошее качественное совпадение результатов, поскольку графики на рисунке 20, а эквидистантны друг другу во всем диапазоне изменения радиальной силы. В заключении автор отмечает, что, сравнивая результаты экспериментов с расчетными температурами, можем отметить, что математическая модель позволяет рассчитать контактные температуры не только при обработке деталей из цельного материала, но и для деталей с покрытием. При этом значения экспериментальных и теоретических данных отличаются не более чем на 10 – 15% при достаточно хорошем, качественном совпадении результатов. В статье Теплофизика процесса алмазного выглаживания Д.Л. Скуратов [20], так же рассматривается теплофизика процесса выглаживания в статье отмечается, что процессы упрочняющей обработки материалов, к которым относится процесс алмазного выглаживания поверхностей заготовок, наряду с другими видами механической обработки всегда сопровождаются выделением теплоты, что обусловлено преобразованием энергии пластической деформации материала в теплоту. Учитывая, что алмазный выглаживающий инструмент представляет собой стальную оправку с закрепленным в ней посредством пайки, как правило, серебряными припоями, кристаллом натурального либо синтетического алмаза, теплостойкость которых составляет 700...800 °С [8], то температура под алмазным индентором не должна превышать указанных значений. Если обработка производится при скоростях выглаживания, равных 400...600 м/мин [8], то температура в зоне деформации может достигать значений теплостойкости, а в поверхностном слое соответственно могут иметь место структурные и фазовые превращения. В том случае, если процесс выглаживания ведется при скоростях до 100 м/мин, что обычно имеет место в условиях производства, то температура не превышает 200...400 °С [8]. Кратковременное воздействие таких температур на поверхностный слой заготовки не приводит к структурным изменениям, но оказывает влияние на формирование напряженно-деформированного состояния поверхности

заготовки. Поэтому для технологов важно располагать достаточно простой аналитической зависимостью, позволяющей рассчитать температуру в зоне обработки, т.е. прогнозировать теплонапряженность процесса алмазного выглаживания на этапе проектирования или совершенствования технологического процесса изготовления детали. Для получения такой зависимости может быть использовано решение задачи о разогреве двух твердых инертных материалов от воздействия силы трения при учете зависимости силы трения от температуры, представленное А.П. Амосовым в работе [21]. Так же в данной работе приводится методика исследований и приведены формулы для расчетов. Результат представлен в виде графиков на рисунках 22-24.

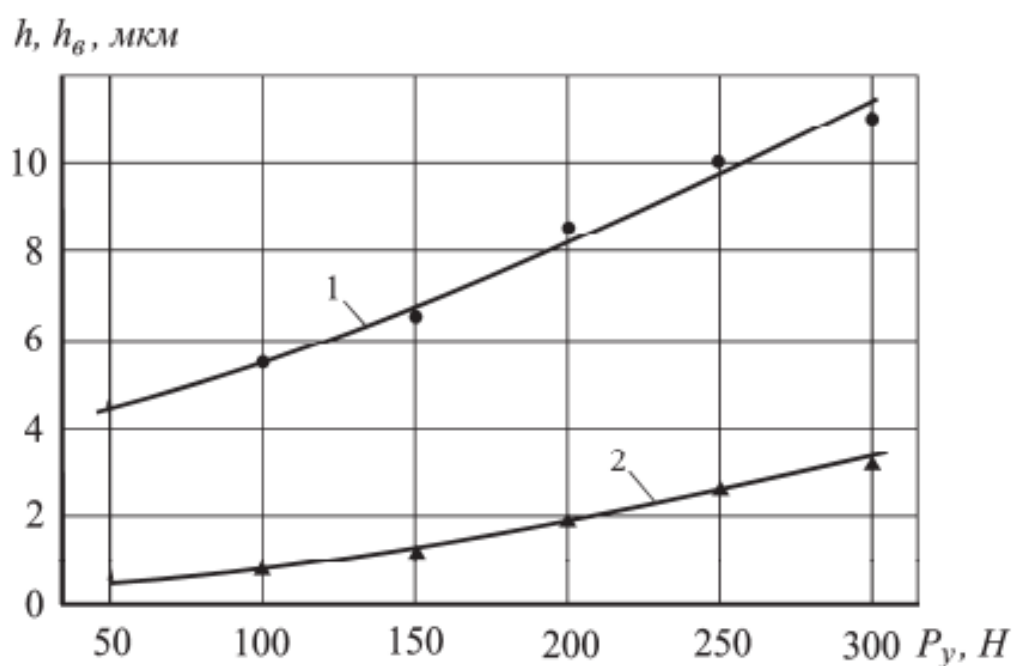


Рисунок 22 – Зависимость максимальной температуры в зоне пластической деформации от усилия выглаживания при $R_{сф} = 2,5$ мм, $v = 40$ м/мин

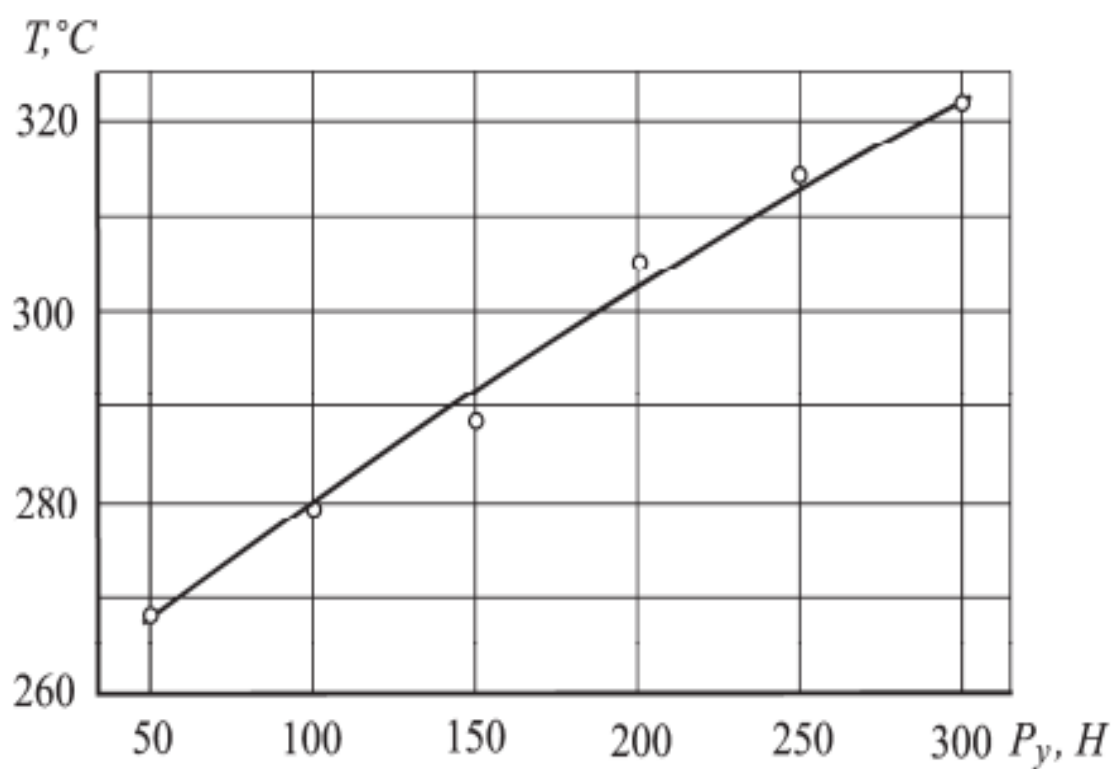


Рисунок 23 – Зависимость максимальной температуры в зоне пластической деформации от скорости выглаживания при $R_{\text{сф}} = 2,5 \text{ мм}$, $P_y = 200 \text{ Н}$

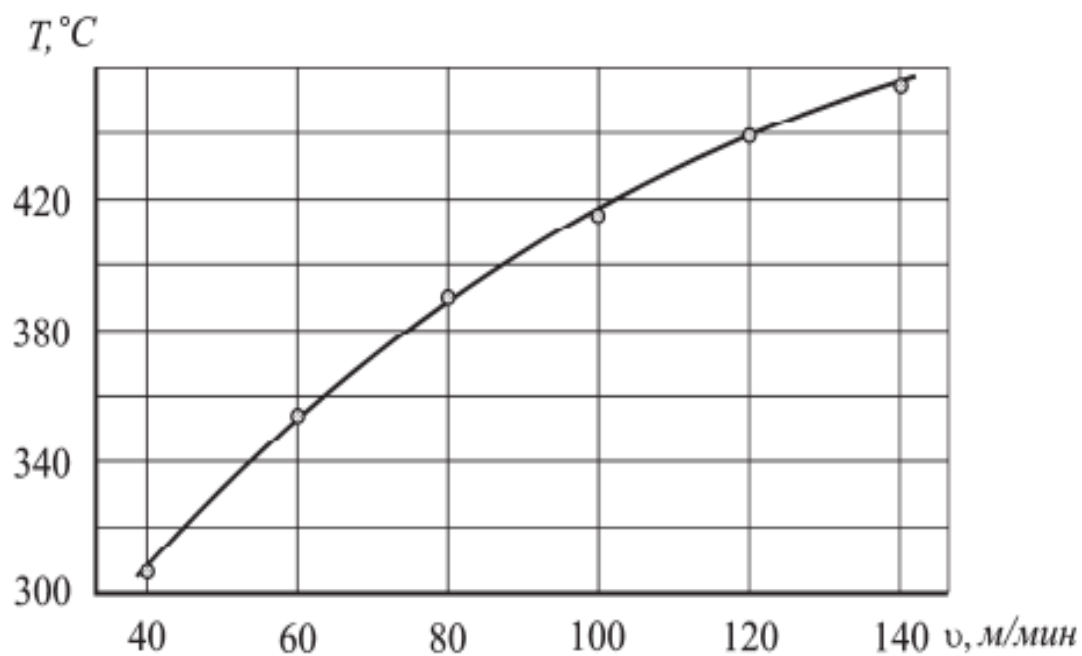


Рисунок 24 – Зависимость максимальной температуры в зоне пластической деформации от скорости выглаживания при $R_{\text{сф}} = 2,5 \text{ мм}$, $P_y = 200 \text{ Н}$

Таким образом изучив описанные выше источники, можно сделать вывод что в российской науке вопрос поверхностного пластического деформирования, в частности методом выглаживания достаточно хорошо изучен для применения его в производстве серийной продукции.

2.10 Смазывающие охлаждающие технические средства для поверхностного пластического деформирования

В работе А.А. Гояса, Е.В. Соловьева, В.А. Полетаева «Применение смазочно-охлаждающих технологических средств для процессов алмазного выглаживания» [22] говорится о пластичных смазывающих охлаждающих средствах, влияние их на обработку детали может быть значительным, согласно источника применения пластичного СОТС данного типа позволяет достичь уменьшения микронеровностей поверхности на 20-25%. Данный тип СОТС имеет существенный недостаток, а именно СОТС – является одноразовым в данном случае, что ставит под сомнение экономическую эффективность данного типа СОТС в крупносерийном и массовом производстве. Данный тип СОТС эффективен только при мелкосерийном или штучном производстве, наносить данный тип СОТС возможно путем погружения рабочей части инструмента в него или путем нанесения СОСТ на поверхность обрабатываемой детали. В научной статье Сулейманова Р.И., Сулейманова Р.Р., Мухтарова Р.Т.: «Оценка эффективности влияний механической активации СОТС на силы резания при обработке бронзовых сплавов» [23] приводятся основные параметры смазывающих охлаждающих средств для оценки эффективности их применения. Согласно источнику: смазывающе-охлаждающее технологическое средство для эффективного противостояния преждевременного износа инструмента должно обладать следующими технологическими параметрами такими как теплопроводность, для уменьшения температурного воздействия на инструмент в зоне обработки. Обеспечение теплоотвода так же способствует уменьшению воздействия сил

трения. Смазывающая охлаждающая жидкость оказывает значительное влияние на процесс обработки методами поверхностного деформирования. В работе А.С. Калашникова «Зубофрезерование цилиндрических колес методом обката без применения смазывающей охлаждающей жидкости» [5] рассматривается метод обработки без применения смазывающей охлаждающей жидкости. Основным преимуществом данного метода – автор считает снижение себестоимости обработки, так как в состав смазывающей охлаждающей жидкости входят дорогостоящие присадки и компоненты, а так же автор отмечает экологическую составляющую эффективности данного метода, так как в окружающую среду нет необходимости выбрасывать токсичные компоненты смазывающей охлаждающей жидкости, что в свою очередь благотворно влияет на условия труда, особенно на здоровье операторов станков, и других людей причастных к обработке. Автор так же приводит схему обработки, представленную на рисунке 25.

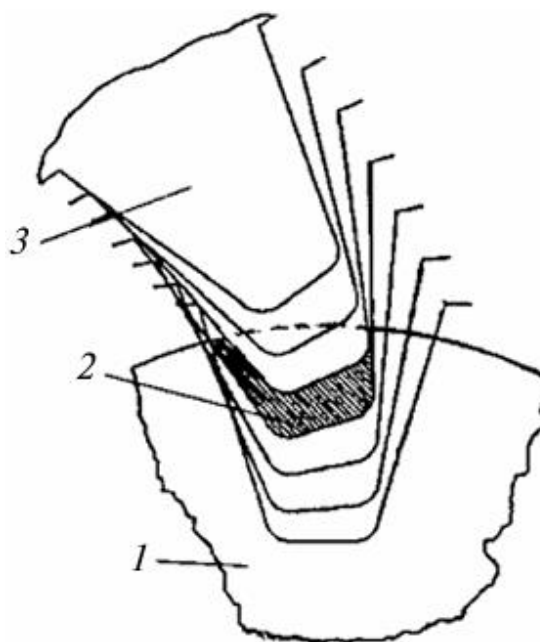


Рисунок 25 – Схема нарезания зубьев червячной фрезой

На рисунке 25 обозначены следующие позиции: 1 заготовка; 2 трехкомпонентная стружка, образуемая при резании; 3 червячная фреза. В результате эксперимента Авторы пришли к выводу, что благодаря корректировке режимов обработки возможно получить достаточную степень качества обработанной детали, а также обеспечить стойкость инструмента с незначительной потерей производительности процесса, которую возможно компенсировать за счет уменьшения затрат на смазывающей охлаждающей жидкости, а также улучшения условий труда работникам, задействованный в производственном процессе. Ещё одним примером работы по обеспечению требуемого уровня качества без применения СОЖ является Работа А.С. Селиванова «технологическое обеспечение шероховатости поверхности, обработанной выглаживанием без применения традиционных смазочных охлаждающих технологических сред» [21]. В данной работе представлены результаты исследований, направленных на получение экспериментальных данных для сравнительного анализа получаемой шероховатости после поверхностного пластического деформирования, а в данном случае выглаживание алмазным индентором. В работе представлены опорные кривые профиля поверхности для различных типов обработки, которые представлены на рисунке 26.



Рисунок 26 – Опорные кривые профиля поверхности

Так же в работе представлены графические изображения регрессионных зависимостей выходных параметров, представленные на рисунке 27.

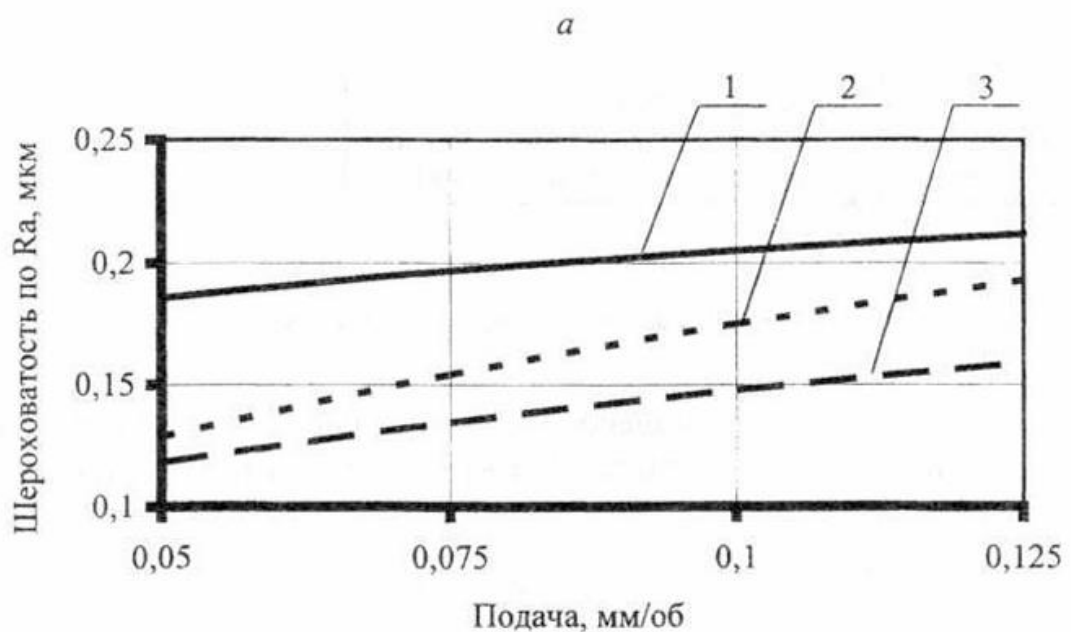
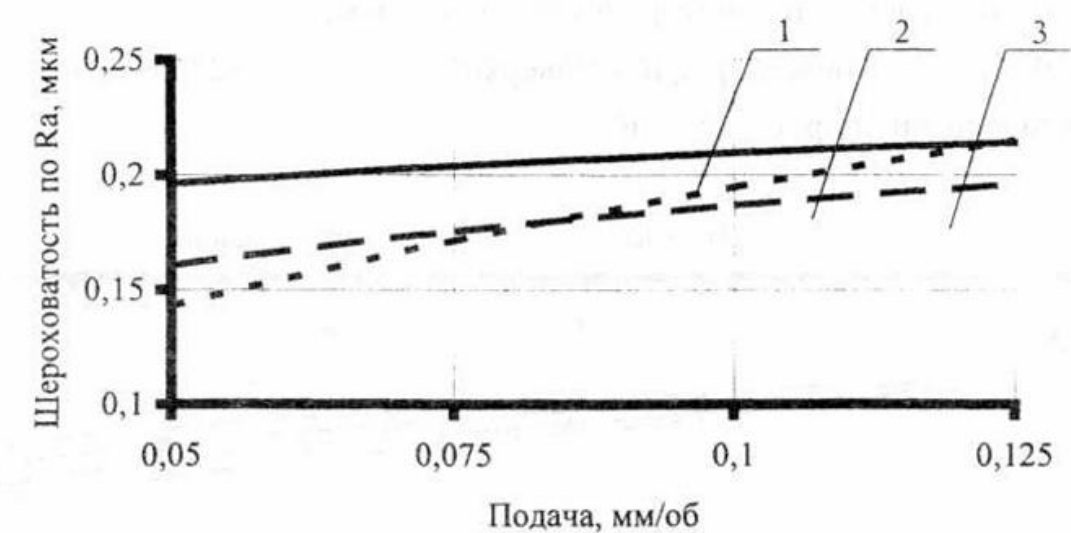


Рисунок 27 – Графические изображения регрессионных зависимостей выходных параметров

Где показана зависимость шероховатости поверхности от подачи при обработке: а - со скоростью K равной 69 м/мин; б - со скоростью V равной 10 м/мин; 1 - обработка с подсолнечным маслом; 2 - обработка без применения СОЖ; 3 - обработка с жидкостью с мойки.

Так же в работе приведены формулы, по которым приводился анализ полученных результатов. Далее в работе приведены зависимости

шероховатости от времени при обработке, которые представлены на рисунке 28.

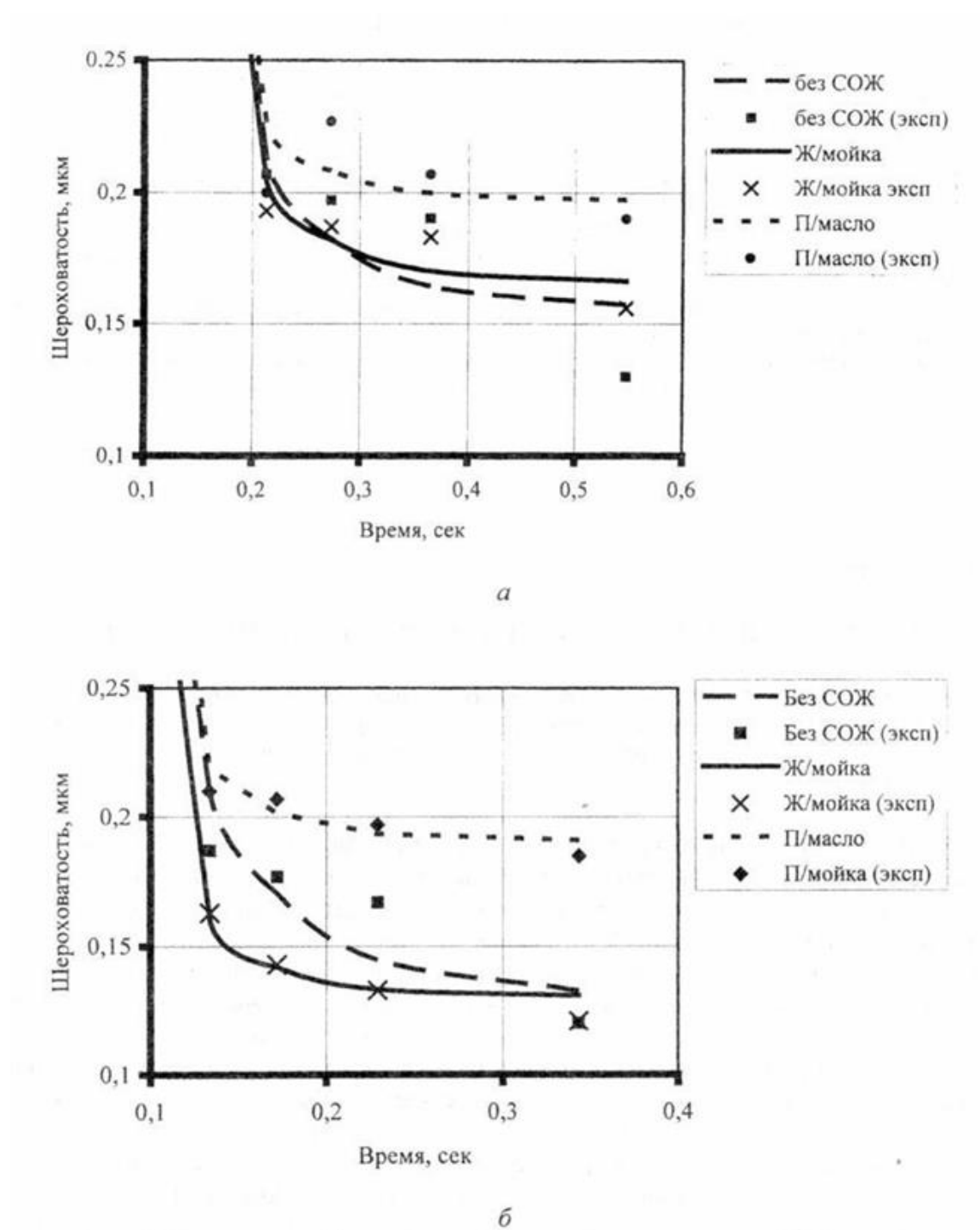


Рисунок 28 – Зависимость шероховатости поверхности от времени при обработке

Далее в работе, основываясь на полученных данных сделан вывод, что применение в качестве СОЖ различных нестандартных материалов, таких как моечный раствор или подсолнечное масло допустимо. В процессе поверхностного пластического деформирования возможно появление трещин при несоблюдении правильности подбора режимов резания, анализом данного направления изучения процесса поверхностного пластического деформирования решили заняться ученые Московского авиационного института в своей работе [22] «Кинетика развития трещин в поверхностно упрочненных деталях» В работе приведены расчетно-экспериментальные методы оценки кинетики развития и образования трещин, так же автор приводит прикладной смысл данной работы, заключающийся в том что результаты эксперимента позволят инженеру эффективнее определить выносливость детали, обработанной данным методом уже на этапе проектирования. Авторы в своей статье приводят схематичные виды усталостных изломов, схемы представлены на рисунке 29.

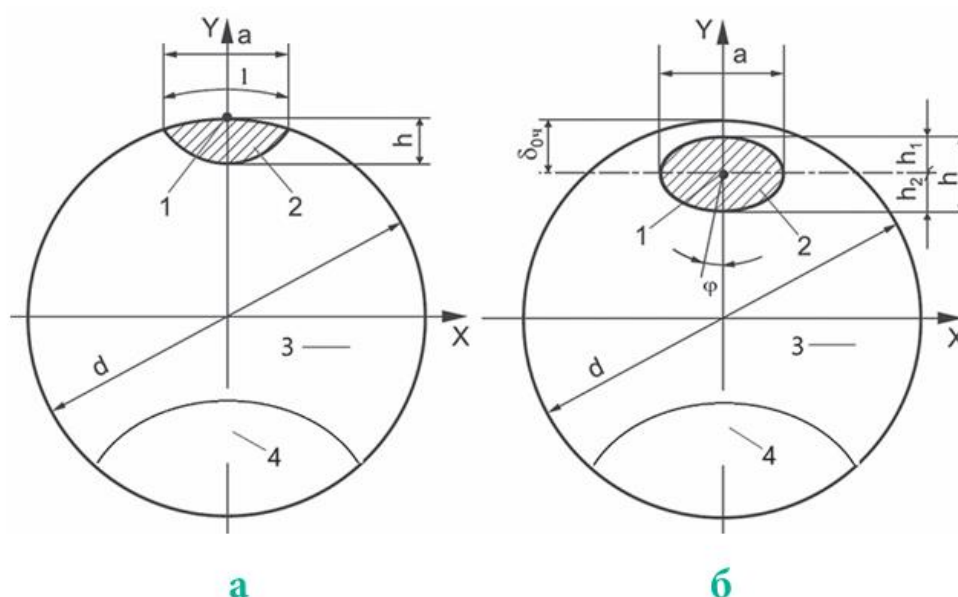


Рисунок 29 – Схематичные виды усталостных изломов образцов

На рисунке 29 обозначены следующие процессы: а – при зарождении трещины с поверхности; б – при подповерхностном зарождении 1 – очаг зарождения усталостной трещины; 2 – область стабильного распространения трещины, представляющая собой блестящее пятно в форме части круга или эллипса; 3 – область ускоренного распространения усталостной трещины, образуется сразу же после выхода трещины на поверхность; с этого момента трещина растет ускоренно как вглубь неупрочненной сердцевины образца, так и в поверхностно упрочненных слоях; 4 – область соответствует окончательному долому образца, которому при напряжениях амплитуды циклических напряжений σ_a , близких по величине к пределу выносливости σ_R , свойственен хрупкий характер разрушения.

Так же в своей работе автор описывает программу эксперимента, исходное состояние образцов и условия проведения испытаний. Далее автор приводит зависимость относительной глубины расположения очага усталостного разрушения от амплитуды напряжения показанную на рисунке 29.

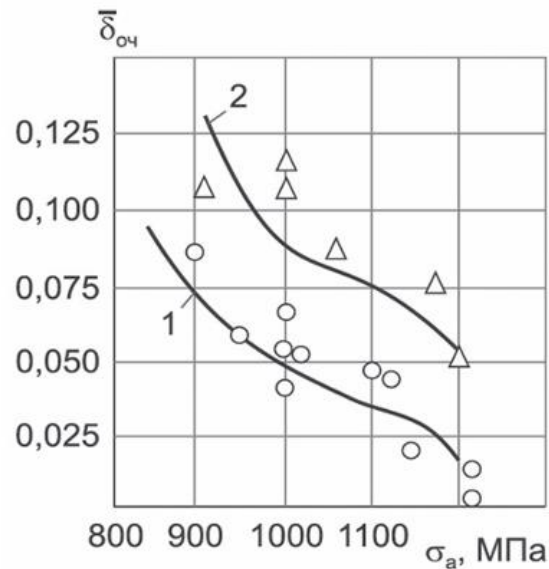


Рисунок 30 – Зависимость относительной глубины расположения очага усталостного разрушения от амплитуды напряжения

Так же в данной статье, как и в предыдущей приводит теоретические изыскания, помогающие понять физику процесса зарождения и распространения трещин. Далее приводится зависимость длины (относительной) трещины от числа циклов нагружения для различных типов обработки детали (см. рисунок 30).

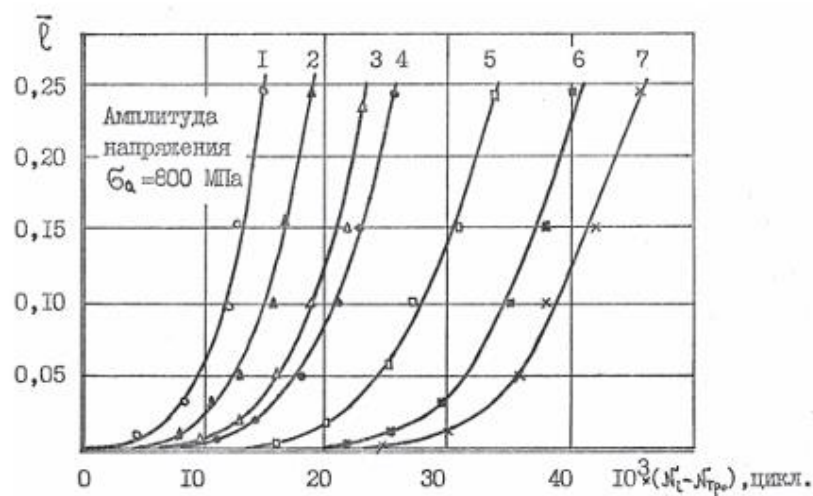


Рисунок 31 – Зависимость длины (относительной) трещины от числа циклов нагружения для различных типов обработки детали

На рисунке 31 представлены следующие кривые: 1 – шлифование; 2 – виброупрочнение; 3 – тонкое точение с углом передней кромки резца γ равной минус 5°; 4 – дробеструйное упрочнение; 5 – тонкое точение с γ равное минус 30°; 6 – алмазное выглаживание; 7 – обкатывание роликом.

Далее приводятся зависимости площади трещины от числа циклов нагружения (рисунок 31).

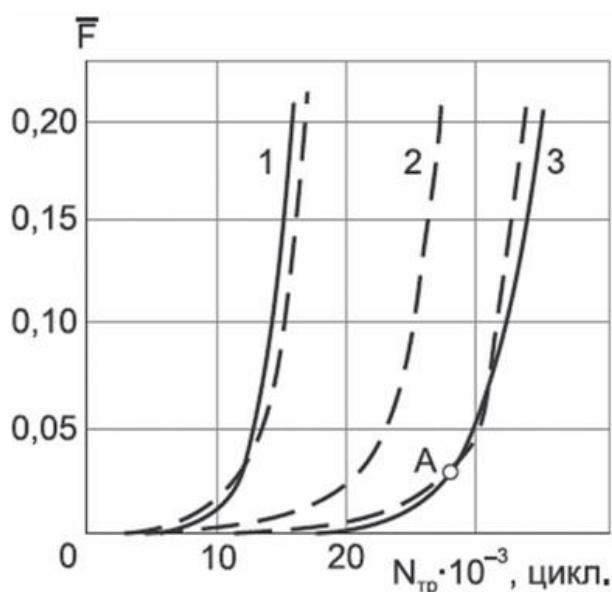


Рисунок 32 – Зависимости площади трещины от числа циклов нагружения

На рисунке 32 представлены следующие кривые: 1, 2 – зарождение трещины на поверхности; 3 – зарождение трещины под поверхностью; 1 – неупрочненные образцы; 2, 3 – образцы, упрочненные дробью. Точка А соответствует выходу трещины на поверхность (сплошные линии – эксперимент, штриховые – расчет).

Результатом эксперимента автор делает вывод о проделанной работе. Во-первых, для оценки кинетики развития усталостных трещин в поверхностно упрочненных образцах и гладких деталях можно использовать формулы, которые автор приводит в своих работах. Эти

формулы позволяют учитывать влияние технологических остаточных напряжений и расположение очага усталостного разрушения (на поверхности или на некоторой глубине упрочненного поверхностного слоя) на кинетику трещин. Экспериментальные данные роста усталостных трещин хорошо описываются предлагаемыми формулами. Во-вторых, предложена методика обработки экспериментальных данных усталостных испытаний с целью оценки величины критического напряжения σ_k , при котором в поверхностно упрочненных образцах происходит смена механизма зарождения усталостных трещин

2.11 Инструмент для поверхностного пластического деформирования

Вопросы разделение инструмента на подгруппы рассмотрены в статье Я.Н. Оттенего, а именно по способу взаимодействия с заготовкой: инструмент для поверхностного пластического деформирования принципиально возможно разделить на 2 группы [2] на жесткий и инструмент упругого взаимодействия. Так же в статье Я.Н. Оттенего дано определение для каждой группы инструмента и приведены особенности его работы и взаимодействия с заготовкой.

2.11.1 Жесткий инструмент для поверхностного пластического деформирования

Согласно приведенной классификации в источнике [2] у жесткого инструмента для поверхностного деформирования ролики закреплены жестко и в процессе обработки занимают постоянное место относительно опорного конуса. В источнике [19] дается представление о применении различных способов получения требуемых параметров заготовки, в том числе, согласно работе профессора Лебедева - широкое распространение получили жесткие инструменты сепараторного типа. Я.Н. Оттенений подвергает данный

инструмент критике так как согласно его работе [1] данный тип инструмента имеет существенный недостаток, связанный с возможной нестабильностью размера заготовки, в следствии чего глубина внедрения инструмента в заготовку будет колебаться, так же на работу данного инструмента влияет его стойкость, а точнее наработка инструмента, из-за чего при работе с данным типом инструмента необходимо постоянно настраивать и регулировать его, даже при обработке одинаковых деталей одной партии. Данное явление приводит к значительному изменению глубины деформированного слоя, что негативно сказывается на работоспособности и качестве обработанной детали.

2.11.2 Упругий инструмент для поверхностного пластического деформирования

Упругий инструмент для поверхностного пластического деформирования отличается тем, что ролики в нем закреплены упруго, с возможностью перемещения на обеденный размер, ограниченный полем допуска на деталь, данное решение позволяет обеспечить постоянное усилие деформирования [24]. Этот инструмент является наиболее прогрессивным с точки зрения качества обработанной поверхности, так как вследствие этого что сохраняется постоянным усилие взаимодействия инструмента с заготовкой обеспечивается равномерная глубина внедрения инструмента в заготовку, вследствие чего обеспечивается равномерная глубина деформированного слоя. Такой тип инструмента так же до определённой поры может компенсировать собственный износ [25], что положительно сказывается на людских ресурсах при производстве, так как от детали к детали инструмент нет необходимости перенастраивать.

2.12 Анализ зарубежных источников

В зарубежной литературе так же упоминается о поверхностном пластическом деформировании, например в статье Шэньюй Ю [26] описывается новая 3D модель смазывающе-охлаждающих жидкостей на основе пластоэластогидродинамической смазки. В данной работе широко и подробно расписан анализ данного СОТС на процесс обработки, вопросы самого по себе поверхностного пластического деформирования в данной статье отражены только с целью понимания сути работы.

В других источниках, таких как «Влияние пескоструйной обработки на поведение малоциклового и многоциклового усталости после механической резки стали с пластичностью, вызванной двойникованием» Антони Лара [27] отмечается современная тенденция к использованию сталей с высоким содержанием марганца, что обусловлено высокими показателями по прочности и деформационной упрочняемости. В данной работе приводится исследование по улучшению механического состояния края детали при резке (реза) методом дробеструйной обработки, отмечается, что данный метод позволяет создать на подповерхностных слоях реза напряженно деформированное состояние материала, что положительно сказывается на долговечности деталей кузова автомобиля. Так же в данной статье приводится сравнение результатов по обработке различных материалов. В исследовании Мин Чена «Определение механических свойств поверхности и стабильности остаточного напряжения для дуплексной нержавеющей стали S AF2507, подвергнутой дробеструйной обработке, с помощью рентгеноструктурного анализа напряжений» [28] отмечается значимый (до 104%) прирост предела выносливости по результатам эксперимента с дробеструйной обработкой данного материала. В статье Антони Лара, Мерсе Рока, Сержи Парареда, Нурия Куадрадо, Джессика Кальво и Дэниел Каселлас «Влияние пескоструйной обработки на поведение малоциклового и много циклового усталости после механической резки стали с пластичностью, вызванной

двойникованием» [29] - описываются интересные особенности высокомарганцевых сталей с точки зрения применения данных сталей в автомобильной промышленности. Согласно источника, стали с высоким содержанием марганца и TWIP-углеродом имеют удачные механические характеристики для изготовления из них автомобильных кузовов, в частности, напряжение на разрыв у данных сталей до 1000МПа при относительном удлинении до 50%, что позволяет использовать их в качестве материала не только для наружных панелей, но и несущих деталей кузова, таких как лонжероны и/или рама, в зависимости от типа конструкции автомобиля. Но отмечается технологическая особенность при работе с данными сталями, связанная с методом получения готовой детали. А именно применяется холодная обработка давлением: вырубка, и формовка. Данные операции влекут за собой образование остаточных напряжений в металле, которые могут снижать его прочность, что будет негативно сказываться при эксплуатации автомобиля, в том числе и на безопасности. В данном источнике расписывается метод обработки зон детали, подвергнутой пластической деформации при формовке и вырубке, позволяющий создать на поверхности детали упрочненный слой методом дробеструйной обработки. Отмечается, что после дробеструйной обработки увеличивается качество поверхности, уменьшается шероховатость, и удаляются различные заусенцы. Результат работы оказался показал, что наибольшего упрочнения достигают образцы, формовка которых сопряжена с меньшими деформациям, если же формовка деталей приводит к более глубокой пластической деформации, то дробеструйная обработка не даёт значимого прироста по усталостной выносливости [30]. Справедливо сделать вывод что, данное явление может быть связано с тем, что глубина поверхностно упрочненного слоя, составляет около 10 мкм (по результатам замеров автора статьи), и если деформация детали приводит к сдвигу более чем на эту величину, то упрочнение в значительной мере не происходит. Ещё одним интересным направлением получения, упрочненного поверхностного слоя является НРТ обработка. Её

особенности обозначены в работе Саад А. Алсубайе, И Хуан, Теренс Г. Лэнгдон «Изменение твердости магниевого сплава AZ80, обработанного методом НРТ при различных температурах». [31] Сама суть данного типа обработки в статье не указывается, зато даётся широкий анализ метода получения заданной микротвердости от температуры в процессе НРТ обработки. Вся работа построена на анализе магниевого сплава AZ80. В статье приведен спектр применения данного сплава, отмечается, что благодаря сочетанию легкости и прочности данного материала, его применение достаточно широко распространено, в том числе в автомобильной промышленности. Данный тип сплава подвергается обработке, целью которой является уменьшение размера зерна до нанометрового масштаба. В статье подробно расписан механизм, с помощью которого планируется достичь требуемых результатов. В результате работы авторы делают вывод о том, что после проведения эксперимента результат упрочнения получился в двое выше исходного состояния, но отмечается неоднородность структуры материала при определённых режимах обработки. Так же в работе не дается представления о том каким образом следует проводить обработку или как изменить режимы обработки, чтобы достичь однородности механических свойств на поверхности детали. Поверхностное пластическое деформирование имеет широкий спектр применения не только в автомобильной и машиностроительной отраслях, но и в биомедицине. Примером служит работа Карлос Нельсон Элиас, Даниэль «Механические и клинические свойства титана и сплавов на его основе (Ti G 2, Ti G4 холоднодеформированный наноструктурированный и Ti G5) для биомедицинских применений» [32]. В данной работе рассмотрены особенности применения различных титановых сплавов в биомедицине, и расширения списка используемых сплавов, благодаря поверхностной обработке. За основу взят коммерческий сплав Ti G 2, Ti G4. В источнике говорится о том, что ограничение использования данных сплавов связано с тем, что механические свойства этих материалов не удовлетворяют требованиям по прочности для применения их в имплантах. И предлагается

способ улучшения механических характеристик с помощью различных методов обработки поверхности, в том числе и методом поверхностного пластического деформирования. Сам процесс ППД и его особенности в данной статье не рассматривается, приводятся лишь результаты и сравнение с другими методами поверхностного упрочнения, а также коммерческое обоснование данной работы. В статье отмечается, что данные материалы ограничены к применению в биомедицине по требованиям к биологической совместимости, а процесс их обработки еще сильнее усугубляет это положение. Стоит отметить, что есть достаточное количество источников, описывающих обработку поверхностно пластическим деформированием сварных швов, данная тема поднималась и в ранее описанных источниках, но более детально данный вопрос рассмотрен в работе Цзянхуэй Ван и Чуань Сюй «Эволюция микроструктуры и механизмы упрочнения Сварных швов из магниевой стали, подвергнутые многократному микроудару при обработке щебнем». [33] В данной работе рассмотрены особенности поведения сварных швов магния со сталью после дробеструйной обработки. Так же в статье описывается актуальность применения данного сварного соединения в том числе в автомобильной промышленности. Описываются положительные свойства стали, как конструкционного материала, а также описывается эффективность применения магния и его сплавов в различных конструкциях, не уточняется каких именно. По результатам работы приводится сравнительный анализ, и результат по прочности на разрыв и твердости. Отмечается, что прочность на разрыв у необработанного сварного шва, с теми же исходными параметрами, на 28% ниже, чем у сварного шва после пескоструйной обработки. Отмечается, что в сфере упрочнения сварных швов существует различные технологии и процессы для этого, но преимуществом дробеструйной обработки служит простота и дешевизна технологии, при сохранении качества обработанного шва. Отмечается важность соблюдения режимов обработки и правильность из выбора. Так же согласно источнику преимуществом данного типа обработки служит значительная стабильность шероховатости обработанной

поверхности, даже при невозможности стабильно удерживать режимы обработки, что является огромным преимуществом в массовом производстве, особенно при организации его в развивающихся странах, с малоразвитой культурой производства. Другим способом поверхностного упрочнения, который необходимо рассмотреть, как конкурента методу ППД - лазерная обработка поверхности. Данный способ широко применяется для обработки титановых сплавов. Например, статья - Цзяси Ло, Желая Сунь, Диншань Лян, Вэньцин Ян, Кей Си Чан, Фузэн Рен, Сюй-Шэн Ян «Сверхпрочный и пластичный кристаллически-аморфный наноструктурированный поверхностный слой на высоко энтропийном сплаве $\text{TiZrHfTaNb}_{0.2}$ с помощью лазерной обработки поверхности» описывает обработку лазером с углубленным анализом вплоть до наночастиц. Сам по себе алгоритм лазерной обработке практически не описывается, зато подробно расписаны результаты эксперимента, рассмотрены особенности микроструктуры материала после обработки на различных глубинах материала от 0.1 мкм до 100 мкм, проведено большое количество опытов и даны результаты анализа. Анализ зарубежных источников показывает интерес к обработке не только в дальнем зарубежье, но и в странах СНГ, например Белорусские ученые провели исследование, в котором рассматриваются особенности пластического деформирования шлифованной поверхности. В статье Мрочек Ж. А., «Шлифование поверхностей с покрытиями, сформированными электромагнитной наплавкой с пластическим деформированием» [34] описываются некоторые недостатки процесса шлифования: данный в силу особенностей технологии не позволяет производить большой съем материала при обработке, использование абразивных свойств режущего круга из-за хаотичной ориентации зерен шлифовального круга, и др., все эти факторы вызывают на детали такие дефекты как «пятнистая твердость», штриховые поверхности и структурные концентраторы напряжений. Эти факторы в значительной мере способны уменьшить прочность детали, поэтому предлагается интересное решение по оптимизации процесса шлифования. На начальном этапе исследования

предлагается производить подачу смазывающей охлаждающей жидкости через поры шлифовального круга, данное решение позволит не только уменьшить расход смазывающей охлаждающей жидкости, но и оптимизировать эффект от ее применения, так как охлаждение будет происходить непосредственно в зоне работы инструмента. Для реализации эксперимента предлагается использовать специально изготовленный для этих задач шлифовальный круг, который помимо конструктивной особенности возможности пропуска через свои пору смазывающей охлаждающей жидкости будет иметь ориентированно расположенные зерна. Пористость при этом составляла 30%, а размер зерна 0,04 мм. Отмечается, что важными факторами так же являются и форма зерен, например параметр радиусов скругления и угол заострения вершин.

В совокупности, данные факторы положительным образом влияют на долговечность деталей в машиностроении, в данной главе приведен подробный анализ того, каким образом достигается повешение долговечности, в случае с валами, важен не только сам материал, также в значительной мере на долговечность детали влияют режимы обработки. При всем при этом обработкой методом поверхностного пластического деформирования возможно добиться не только повышения показателя долговечности, но и обеспечить применение в конструкции более доступных конструкционных сталей, без изменения технических характеристик, в отдельных же случаях удастся достичь более высоких показателей надежности даже с учетом применения в конструкции более доступных нелегированных сталей. Попутно с повышением долговечности деталей, которая достигается более высокими показателями сопротивления механического износа, достигается повышение коррозионной стойкости для нелегированных сталей, что также косвенно способствует увеличению долговечности деталей, работающих в агрессивных средах.

3. Разработка устройства для поверхностного пластического деформирования.

3.1 Особенности инструмента для поверхностного пластического деформирования с точки зрения проектирования

В отличие от традиционных методов резания, процессы ППД требуют не только точного позиционирования инструмента, но и стабильного усилия его прижатия к обрабатываемой поверхности, поскольку именно контактное взаимодействие определяет характеристики формируемого поверхностного слоя [35]. Выбор способа создания усилия прижатия становится критически важным при проектировании технологической оснастки для ППД. Он напрямую влияет на воспроизводимость обработки, стабильность прижатия инструмента к обрабатываемой поверхности и, как следствие, на эксплуатационные свойства обрабатываемых деталей. В зависимости от сложности геометрии детали, условий обработки и требований к качеству поверхности применяются различные технические решения – от упругих и инерционных до пневматических, гидравлических и активных исполнительных систем.

К системе прижатия инструмента предъявляются следующие основные требования:

- стабильность усилия по всей длине обрабатываемой поверхности;
- регулируемость усилия в зависимости от типа детали, её геометрии и материала детали с учетом термической обработки;
- воспроизводимость параметров при многократных циклах обработки;
- минимизация инерционности, что особенно важно при обработке сложных профилей с резкими изменениями геометрии;
- компактность и интегрируемость в конструкцию инструмента или технологической оснастки;
- совместимость с системами числового программного управления для

- высокоточной и автоматизированной обработки;
- надёжность и технологичность конструкции, особенно в условиях серийного или массового производства.

Выбор решения по реализации прижатия должен учитывать также наличие на производстве рабочей среды (масло, воздух, вакуум), габариты зоны обработки, требования по ресурсу инструмента и возможность дистанционной настройки или адаптации усилия в реальном времени.

С учётом изложенных требований в практике поверхностного пластического деформирования используется широкий спектр технических решений, обеспечивающих усилие прижатия инструмента. Конструкции таких систем варьируются от простых упругих элементов до высокоточных исполнительных механизмов с регулируемыми параметрами. Далее рассмотрены основные подходы, их конструктивные особенности, преимущества и ограничения при использовании в различных производственных условиях.

3.1.1 Использование упругих элементов как источника усилия прижатия.

Одним из наиболее распространённых способов создания усилия прижатия в устройствах для поверхностного пластического деформирования является использование упругих элементов, таких как пружины. Данный тип воздействия на индентор предложен в изобретениях [36], [37], [38]. Популярность данного подхода объясняется простотой конструкции, компактностью, а также отсутствием необходимости в гидравлической или пневматической системе, что упрощает эксплуатацию и снижает требования к обслуживанию. На рисунке 33 представлена одна из вариаций реализации данного принципа.

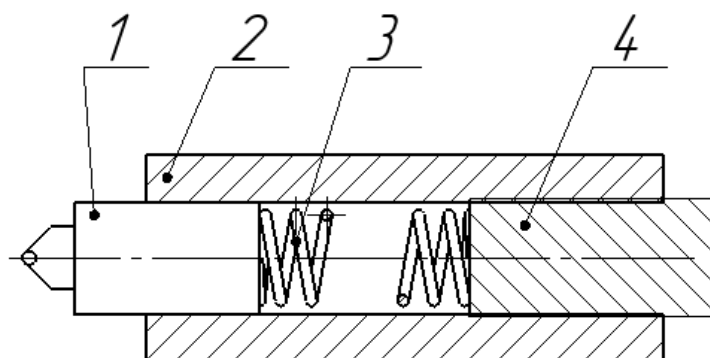


Рисунок 33 – Схема устройства с созданием усилия на индентор с помощью упругих элементов

В представленном варианте устройства с индентором 1, плавающим в корпусе 2, в качестве элемента, создающего усилие, применяется пружина 3, поджимаемая регулировочной гайкой 4. Основное усилие создается с помощью точного позиционирования инструмента относительно детали, а пружина лишь компенсирует незначительные линейные перемещения инструмента относительно заготовки. Для обработки поверхности сложного профиля необходимо придать движению инструмента эквидистантно поверхности обрабатываемого профиля, что увеличивает требования к оборудованию, и в большинстве случаев требует применения станков с числовым программным управлением.

К преимуществам данного подхода можно отнести: простоту конструкции; отсутствие необходимости в сложных уплотнениях; компактность и возможность интеграции в ограниченное пространство держателя инструмента.

К недостаткам относятся: низкая точность настройки усилия; отсутствие возможности оперативной регулировки при изменении условий обработки; необходимость в специальном оборудовании для предварительной настройки; высокая чувствительность к отклонениям при обработке сложных профилей, особенно при малом ходе инструмента.

3.1.2 Формирование усилия прижатия за счёт давления жидкости.

Усилие на индентор в некоторых устройствах создается с помощью давления жидкости. Вариант данного подхода представлен на схеме (см. рисунке 33).

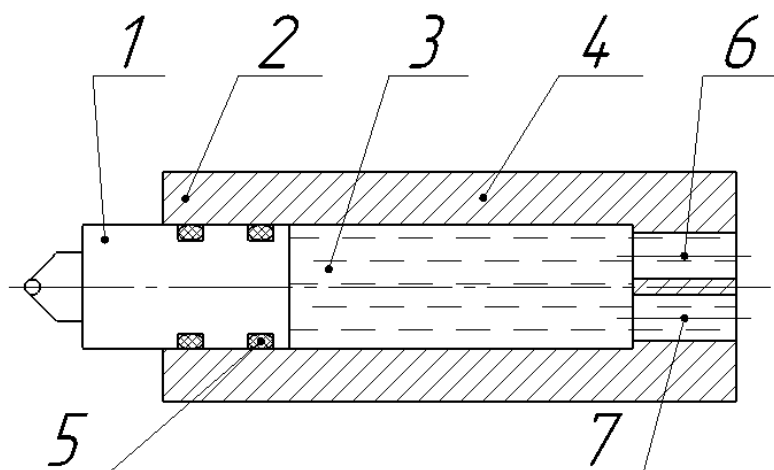


Рисунок 34 – Схема устройства с созданием усилия на индентор с помощью давления жидкости

Принцип создания усилия основан на воздействии давления жидкости 3, создаваемого гидростанцией на цилиндр с индентором 1. Жидкость подается через канал 6 в полость корпуса 2, который уплотняется по диаметру с помощью уплотнений 5. Слив жидкости происходит через сливной канал 7. Данный способ создания усилия широко распространен в машиностроении. В данных устройствах усилие создается при помощи гидронасоса, поддерживающего заданное давление в гидросистеме.

Так же возможно создание закрытого гидравлического контура, где усилие будет создаваться при помощи сжатия жидкости в полости. Конструкция данного типа устройства представлена на рисунке 34. Принцип создания усилия основан на том, что жидкость 3 находящаяся в полости корпуса 2 сжимается путем затяжки гайки 4, воздействует на цилиндр с

индентором 1 который, уплотняется уплотнителями 5.

К преимуществам данного подхода создания усилия можно отнести: высокую точность настройки усилия, простоту конструкции, относительную компактность устройства.

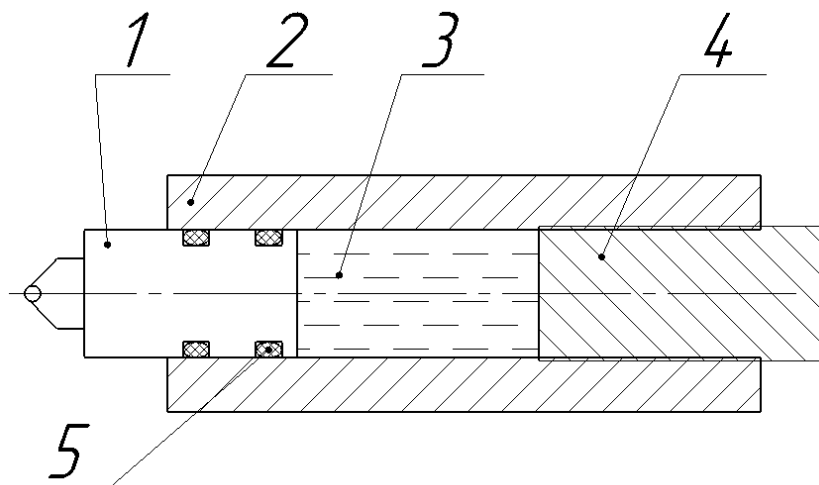


Рисунок 35 – схема устройства с способом создания усилия при помощи давления жидкости, сжатой в полости

К основным недостаткам относятся: необходимость сложных уплотнений для избежания утечек, необходимость подвода гидравлической линии к инструменту, инертность, связанная с ограничениями потока от гидравлической линии и из-за высокой составляющей сил трения в уплотнениях, для системы с закрытым контуром дополнительно – сложность заправки маслом, необходимость частой регулировки и невозможность обработки сложных поверхностей без придания устройству дополнительного перемещения эквидистантно обрабатываемой поверхности.

3.1.3 Применение сжатого воздуха для создания регулируемого усилия.

Усилие на инструмент возможно создать при помощи давления воздуха. Данный подход рассмотрен в статье [39]. В данной работе предлагается в

качестве рабочего тела использовать сжатый воздух, подаваемый в инструмент под определенным давлением. Основной выбор в пользу сжатого воздуха, автор объясняет тем, что существует возможность легкого регулирования давления, путем сброса или набора воздуха в полости инструмента. Схема устройства изображена на рисунке 36.

Принцип создания усилия аналогичен гидравлическому с открытым контуром, и основан на том, что в полость корпуса устройства 2 через канал 6 происходит набор сжатого воздуха 3, который воздействует на поршень с индентором 1, уплотняемым уплотнителями 5. Через клапан 7 происходит сброс избыточного давления.

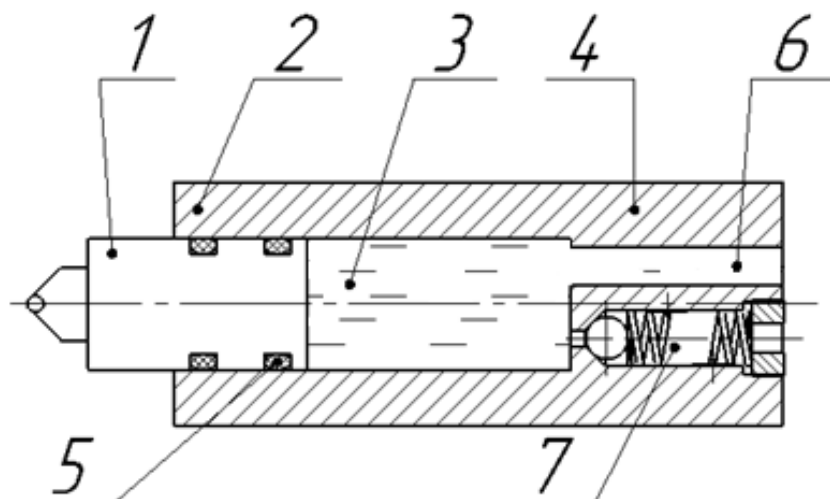


Рисунок 36 – Схема устройства с способом созданием усилием на инденторе с помощью давления сжатого воздуха

К преимуществам данного подхода можно отнести: высокую точность настройки усилия, простоту конструкции, относительную компактность устройства, возможность обработки сложных поверхностей без частой регулировки, возможность подключения к общему компрессору предприятия или пневмосистеме станка.

К недостаткам относятся: необходимость поддержания давления, ограниченная скорость перемещения инструмента из-за значительных сил

трения в уплотнениях.

3.1.4 Генерация прижимного усилия с использованием магнитных систем.

Усилие на инструмент возможно создать при помощи магнитного поля, действующего на проводник или с помощью сервомотора. Одним из примеров данного типа устройства служит изобретение [40], в котором применены 2 пакета магнитов. Схема устройства показана на рисунке 37.

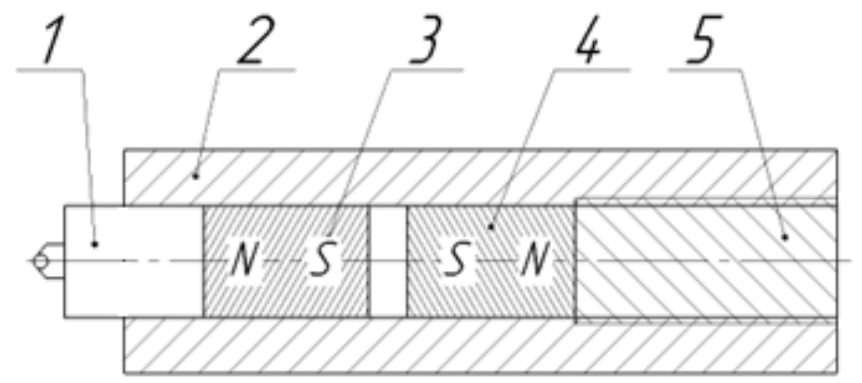


Рисунок 37 – Схема устройства с способом созданием усилием на инденторе с помощью магнитного поля

Принцип работы устройства основан на том, что одноименные полюса магнитов 3 и 4 отталкиваются друг от друга. Магнит 3 закреплен на поршне с индентором 1, а магнит 4 опирается на гайку 5. При взаимодействии магнитов поршень 1 движется относительно корпуса 2 тем самым создается усилие. Данное устройство не подразумевает обработку сложных профилей поверхности, так как не способно обеспечить стабильное усилие прижатия при разном положении штока. Для обработки сложных поверхностей в устройствах данного типа следует заметить постоянный магнит на возбуждаемый с помощью тока, тогда с помощью изменения силы тока будет возможность обеспечить постоянную силу прижатия.

К преимуществам данного подхода относятся: простота механической части конструкции, низкая масса подвижных частей инструмента, возможность обработки сложных профилей поверхности без регулировки простота регулировки усилия прижатия инструмента.

К недостаткам данного подхода относятся: необходимость подвода электрического тока к инструменту при обработке, сложность объективной оценки усилия прижатия инструмента к детали.

3.1.5 Актуаторы на основе пьезоэлементов для точного управления усилием.

Усилие на инструмент возможно создать при помощи пьезоэлементов. Схема устройства показана на рисунке 38.

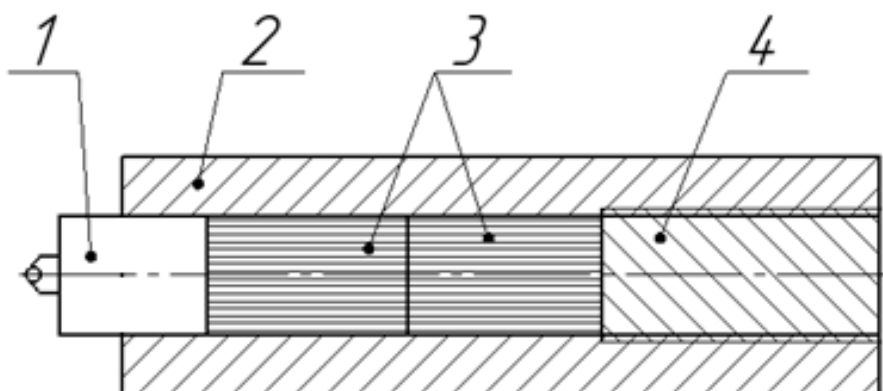


Рисунок 38 – Схема устройства с способом создания усилия на индентор при помощи пьезоэлементов.

Принцип работы такой схемы устройства основан на расширении пьезоэлементов 3 под действием электрического поля. Пьезоэлементы находятся в корпусе 2 и поджимаются гайкой 4 к поршню 1. Во время того как через пьезоэлементы проходит электрический ток они расширяются, толкая поршень 1. Данный тип создания усилия предложен в разработке немецких ученых [41]. В данной работе представлен способ создания усилия и

перемещения с помощью пакета пьезоэлементов. Подробное описание данного способа создания усилий дано в работе [42] А. Г. Амельченко Системы управления и элементы усиливающего пьезоэлектрического актуатора для прецизионного позиционирования. В данной работе приведены так же основные преимущества данного метода создания усилий, но только для микроскопических перемещений.

К преимуществам данного подхода относятся: простота механической части конструкции, низкая масса подвижных частей инструмента, низкая инертность, простота регулировки усилия прижатия инструмента.

К недостаткам данного подхода относятся: необходимость подвода электрического тока к инструменту, малые хода инструмента, для обработки геометрии с большими перепадами высот. Подводя итоги по внедрению в конструкцию устройства для выглаживания пьезоэлементов стоит отметить, что с помощью них возможно только точечное регулирование перемещения инструмента в зоне контакта с деталью, то есть использовать данные устройства как вспомогательную систему для увеличения точности обработки, основную же составляющую перемещения инструмента стоит возложить на другой тип воздействующего элемента.

3.1.6 Центробежные механизмы как автономный источник усилия.

Данный способ воздействия на индентор предложен в статье [43]. Принцип создания усилия основан на вращении корпуса 2 вокруг оси устройства под действием центростремительного ускорения возникает сила, стремящаяся выдвинуть грузы 3, которая с помощью системы рычагов 4 передается на выглаживающий инструмент, показанный на рисунке 39.

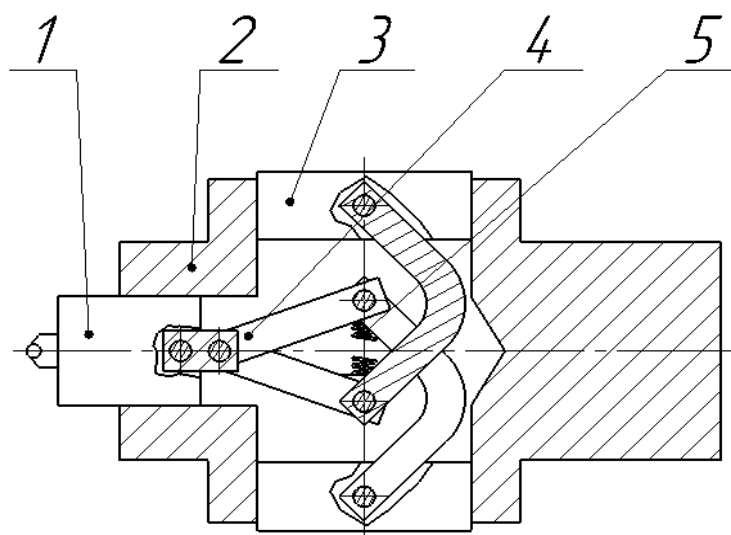


Рисунок 39 – Схема устройства для выравнивания

К преимуществам данного подхода можно отнести: простоту определения усилия, простоту настройки.

К недостаткам данного подхода относятся: нестабильное усилие прижатия при обработке сложных поверхностей со значительными резкими перепадами высоты профиля; инструменту необходимо сообщать как поступательное, так и вращательное движение; значительные размеры вращающейся части инструмента; для стабильного усилия прижатия требуется высокая точность частоты вращения инструмента.

3.2 Сравнительный анализ технических решений.

Сравнение различных способов создания усилия прижатия инструмента позволяет оценить их применимость в зависимости от условий обработки, сложности поверхности и требований к точности. В таблице 1 представлены основные характеристики рассмотренных технических решений.

Таблица 1. Сравнительный анализ технических решений, направленных на обеспечение усилия прижатия инструмента при поверхностном пластическом деформировании

Способ создания усилия	Сложность конструкции	Диапазон создаваемых усилий	Стабильность создаваемого усилия	Рекомендуемая область применения
упругие элементы	простая	средний	высокая	обработки на станках с чпу в условиях серийного производства
гидравлические системы (с закрытым контуром)	умеренная	высокий	средняя	исследовательские работы, обработка на универсальных станках в условиях мелкого и среднесерийного производства
гидравлические системы (с открытым контуром)	умеренная	высокий	высокая	обработка на автоматических линиях в условиях массового и крупносерийного производства
пневматические системы	умеренная	средний	низкая	
магнитные системы	простая	низкий	средняя	обработки на станках с чпу в условиях серийного производства
пьезоэлектрические элементы	умеренная	низкий	высокая	использование только в качестве вспомогательной системы тонкой доводки
центробежные механизмы	сложная	средний	средняя	обработки сложного профиля без резких перепадов высот при отсутствии сжатого воздуха или гидростанции

Выбор конкретного технического решения должен базироваться на совокупности факторов: вид обрабатываемой поверхности, условия обработки, необходимая точность и производственные ограничения. Так в лабораторных условиях, при проведении исследовательских работ по подбору

оптимальных режимов обработки и испытанию новых инструментов, целесообразно применение устройств с закрытым гидравлическим контуром, обеспечивающим высокий диапазон настройки прижимного усилия инструмента к обрабатываемой поверхности, а также простоту использования данных устройств на универсальных токарных станках. Для обработки на станках с числовым программным управлением широкое распространение получили системы на базе упругих элементов, обладающие достаточной простотой и высокой компактностью. В составе автоматических линий рационально использовать решения на основе гидравлических и пневматических приводов, способных обеспечить стабильную работу при серийном или массовом производстве. Для обработки внутренних цилиндрических поверхностей эффективны устройства с центробежным принципом действия, особенно при работе в условиях постоянной скорости вращения. В случаях, требующих высокой чувствительности и минимального воздействия на заготовку, например, при обработке прецизионных или тонкостенных деталей, наибольший потенциал демонстрируют устройства с использованием магнитных систем и пьезоэлектрических актуаторов.

3.3 Разработка универсального устройства для поверхностного пластического деформирования

Обеспечение стабильного и контролируемого усилия прижатия инструмента является одним из ключевых факторов, определяющих эффективность процессов поверхностного пластического деформирования. От выбора способа создания усилия зависят параметры формируемого микрорельефа, глубина упрочнённого слоя, равномерность обработки и как следствие показатели качества обработанной поверхности. Развитие технологий финишной обработки в условиях цифрового производства предполагает интеграцию систем прижатия с интеллектуальными модулями управления. Это открывает перспективы создания адаптивной

технологической оснастки, способной в автоматическом режиме поддерживать оптимальное усилие прижатия в зависимости от текущих условий обработки и свойств материала. В рамках данной работы было разработано устройство для поверхностного пластического деформирования, в основе которого рычажный механизм, усилие создается с помощью пружины. Устройство изображено на рисунке 39.

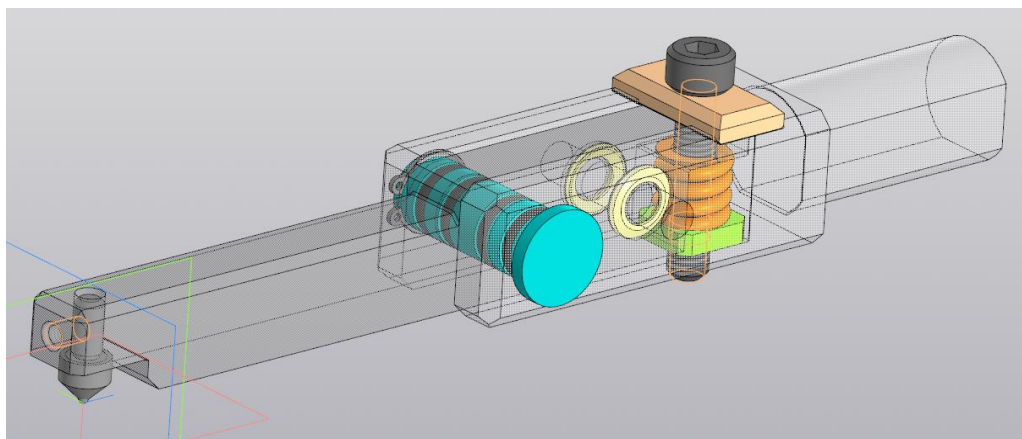


Рисунок 40 – Устройство для выравнивания

В устройстве применены элементы, гасящие колебания при обработке, позволяющие компенсировать зазоры в подвижных частях рычажного механизма: ось рычага установлена на 4 резиновых кольцах, которые благодаря деформации при установке компенсируют зазоры, при этом позволяют сохранить подвижность рычажной системы. Продольные колебания, возникающие в соединении рычага и корпуса гасятся своеобразными тарельчатыми пружинами, изготовленными из пластмассы, данное решение позволяет компенсировать зазор между рычагом и корпусом, при этом сохраняет подвижность рычажного механизма. Вместе с устройством для выравнивания так же было разработано устройство для настройки усилия выравнивания, позволяющее настраивать усилие в диапазоне от 50 до 500 Н. Устройство для настройки усилия выравнивания изображено на рисунке 40.

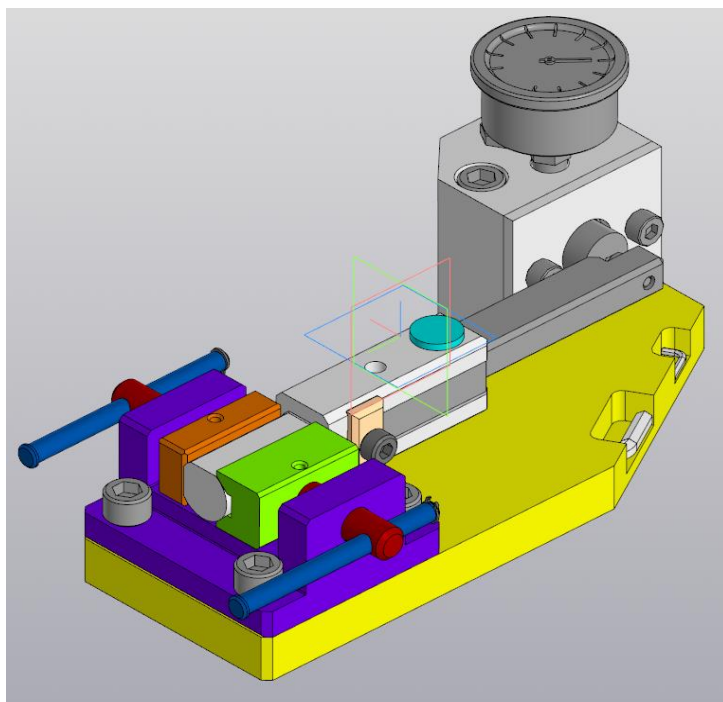


Рисунок 41 – Устройство для настройки усилия выглаживания

Данное устройство является неотъемлемой частью устройства для выглаживания, так как позволяет освободить рабочую зону станка от излишних компонентов устройства для выглаживания.

4 Безопасность и экологичность объекта

4.1 Воздействие объекта на производственную сферу и окружающую среду

В данной работе рассматривается вопрос исследования напряженно-деформированного состояния деталей в машиностроении. Предметом исследования является процесс поверхностного пластического деформирования, его ключевые особенности, а также влияние данного метода отделочно-упрочняющей обработки на качество и долговечность обработанных этим методом деталей. Одной из задач работы является разработка универсального устройства для обработки деталей методом отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием. К устройству предъявляются особые требования, связанные с его функциональным назначением:

- обеспечение возможности безопасного и эффективного использования устройства для обработки внутренних поверхностей тел вращения на универсальных токарных станках;
- обеспечение возможности безопасного и эффективного использования для обработки наружных поверхностей тел вращения на универсальных токарных станках;
- обеспечение возможности безопасного и эффективного использования устройства для обработки внутренних поверхностей тел вращения на станках с числовым программным управлением;
- обеспечение возможности безопасного и эффективного использования для обработки наружных поверхностей тел вращения на станках с числовым программным управлением;
- обеспечение возможности регулировки усилия поверхностного пластического деформирования в диапазоне от 50 до 500 Ньютонов;

- точность поддержания усилия вне зависимости от типа оборудования не менее плюс минус 5 процентов от заданного.

В работе рассматривается внедрение процесса поверхностного пластического деформирования вместо процесса чистовой токарной обработки, отдельно рассматривается замена процессом выглаживания процесса шлифования, а также внедрение процесса поверхностного пластического деформирования методом дробеструйной обработки вместо процесса полирования. В данном разделе предлагается рассмотреть процесс поверхностного пластического деформирования, как вариант замены процесса шлифования на финишных операциях с точки зрения безопасности и экологичности, а так же оценить влияние проектируемого устройства с точки зрения негативного влияния на здоровье человека, находящегося в непосредственной близости к нему (оператора), а так же предложить варианты того, как данные факторы нивелируются при помощи современных средств защиты.

При обработке шлифованием необходимо применение смазывающих охлаждающих технологических средств и жидкостей [44], которые не всегда могут обеспечить одновременно требования по эффективному отводу тепла и стружки, а также требования по охране здоровья оператора [45]. С точки зрения объема смазывающих охлаждающих средств, процесс шлифования является одним из наиболее емких [46], данный фактор в значительной мере позволяет считать данный процесс неэффективным с точки зрения охраны окружающей среды, и здоровья оператора. Помимо значительного применения в процессе шлифования смазывающих охлаждающих технологических средств и жидкостей, данный процесс непосредственно связан с загрязнение окружающей среды мелкой стружкой, загрязняющей дыхательные пути и легкие человека, при том данный фактор является накопительным, и оператор не в состоянии оперативно отслеживать состояние своего здоровья [47], [22]. Замена данного процесса отделочно-упрочняющей обработкой методом поверхностного пластического деформирования, позволит минимизировать

отдельные вредные факторы, а также отдельные вредные факторы позволит полностью исключить. С точки зрения тепловой затрат энергии процесса поверхностного пластического деформирования он является менее затратным нежели процесс шлифования до 20%, в зависимости от технологических особенностей [48], что позволит сократить негативное воздействие на окружающую среду с точки зрения затраты электроэнергии. Но помимо фактора расхода и выработки электроэнергии процесс поверхностного пластического деформирования – исключает образование стружки в процессе обработки [49], что положительно влияет на дыхательную систему оператора, работающего у оборудования в данном процессе. Помимо сказанного выше процесс поверхностного пластического деформирования в большинстве случаев не требует столь обильного применения смазывающих охлаждающих технологических средств и жидкостей, а в отдельных случаях, данный процесс вообще полностью исключает применения смазывающих охлаждающих технологических средств [50]. Рассмотрение вредных факторов обработки методом поверхностного пластического деформирования представлено в таблице 2.

Таблица 2 – вредные факторы обработки методом поверхностного пластического деформирования и возможные негативные последствия

Факторы	Последствия
мелкая, практически отсутствующая как явление стружка	осадок стружки на дыхательных путях и легких человека, необратимые последствия для человека при длительном воздействии
токсичные испарения смазывающих охлаждающих технологических средств и жидкостей при обработке	загрязнения окружающей среды, начиная от человека, работающего непосредственно у оборудования, заканчивая выбросами в атмосферу, пожарная опасность

Продолжение таблицы 2

вибрации при обработке	повышенная нагрузка на почву, вред человеку, находящемуся в непосредственной близости с оборудованием, негативное влияние на микроорганизмы, находящиеся в почве
травмоопасное оборудование	получение травм участниками технологического процесса, таких как порезу, ранения, вплоть до потери конечностей с летальным исходом

Рассмотренные в таблице 2 факторы необходимо проанализировать на предмет того, как нивелировать их в технологическом процессе с помощью современных мер предупреждения травматизма, а также мероприятий, направленных на улучшение условий труда и безопасность производства.

4.2 Средства и методы снижения негативного воздействия объекта

Выделив основные негативные факторы, воздействующие на окружающую среду и человека (приведены в таблице 2) возможно проработать мероприятия и технические решения, позволяющие в некотором смысле компенсировать негативное воздействие. Рассмотрим основные факторы:

- мелкая, практически отсутствующая как явление стружка;
- токсичные испарения смазывающих охлаждающих технологических средств и жидкостей при обработке;
- вибрации при обработке;
- травмоопасное оборудование.

Данные факторы необходимо проанализировать на предмет минимизации влияния их на организм человека, а также на окружающую среду. Фактор стружки необходимо рассматривать как объект, влияющий на здоровье человека, следовательно необходимо определить источник данного

фактора, им является инструмент, который при взаимном перемещении относительно заготовки создает за собой шлейф из стружки [25]. Данный инструмент располагается в рабочей зоне станка. Исходя из этого для обеспечения отсутствия влияния данного фактора на здоровье человека – требуется изолировать рабочую зону станка от оператора. Также дополнительным мероприятием по исключению данного фактора в производственной системе является применение смазывающих охлаждающих технологических жидкостей, которые будут в процессе работы задерживать в себе стружку смешиваясь с ней. Далее после изоляции рабочей зоны оборудования требуется обеспечить регулярную чистку рабочей зоны оборудования, так как в процессе работы оператор или наладчик периодически попадает туда, например для смены инструмента. Автоматическая смена заготовки, так же положительным образом скажется на здоровье оператора, так как необходимость работы в загрязненной зоне будет сведена к минимуму.

Другой негативный фактор, оказывающий воздействие на окружающую среду – это токсичные испарения смазывающих охлаждающих технологических средств и жидкостей. Одним из вариантов решения данной проблемы – является полное исключение смазывающей охлаждающей жидкости из процесса механической обработки [22]. Но данное решение за собой повлечет отсутствие скапливания в жидкости мелкой стружки, которую необходимо будет собирать с помощью специальных систем вытяжки и вентиляции с последующей фильтрацией. Поэтому необходимо обеспечить минимальное количество СОТСиЖ при обработке, чтобы минимизировать испарение, а также применять в оборудовании системы вытяжки, показанные на рисунке 42 с фильтрующими элементами.



Рисунок 42 – Система вытяжки с фильтрацией

Также процесс испарения необходимо рассматривать с точки зрения пожарной безопасности, так как в большинстве случаев в СОТСиЖ имеют в своем составе бензольные соединения. Необходимо обеспечить в быстром доступе минимальный набор инструментов пожаротушения, а также снабдить цеха централизованной системой пожаротушения.

Факторы вибраций необходимо исключать с помощью современных методов гашения вибраций, например применение гидроопор оборудования, данный фактор в современном машиностроении уже сведен к минимуму, поэтому рассмотрение его не требует дополнительного внимания.

Другой фактор негативного воздействия – это травматизм при выполнении операции. Данное негативное воздействие возможно практически полностью исключить в современном машиностроении. Например, рабочая зона станка, где находятся все подвижные элементы полностью изолирована от человека, так же изолировать необходимо всю электрическую составляющую оборудования схема токарного станка с числовым

программным управлением и защитным кожухом зоны обработки показана на рисунке 43.

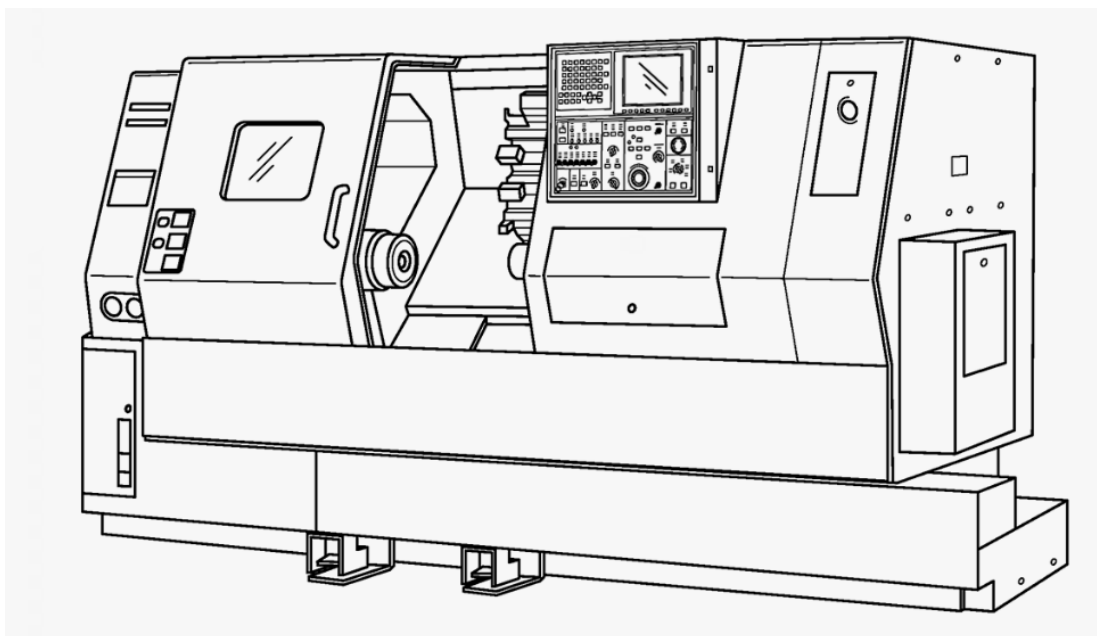


Рисунок 43 – Схема токарного станка с числовым программным управлением [51]

Выполнение этих требований приведет к минимизации травматизма. Так же стоит отметить необходимость в средствах индивидуальной защиты для операторов. Дополнительно необходимо разработать мероприятия по контролю за соблюдением надлежащего использования операторами средств индивидуальной защиты. К способам изоляции оператора от рабочей зоны оборудования относят:

- защитный барьер в виде корпуса станка, на котором производится обработка;
- световой барьер, показанный на рисунке 44, который в случае его прерывания мгновенно прерывает энергоснабжение, и экстренно останавливает подвижные части оборудования;
- дополнительные средства защиты, в виде различного рода датчиков проникновения.



Рисунок 44 – Световой барьер для оборудования [52]

Комплекс мер поможет исключить травматизм из производственной системы. В таблице 3 вкратце представлены мероприятия, направленные на обеспечение минимизации последствий негативного влияния производственных факторов в первую очередь на здоровье человека, а также позволяющих минимизировать или полностью исключить их влияние на окружающую

Таблица 3 – мероприятия по снижению влияния негативных производственных факторов на здоровье человека и окружающую среду

Производственный фактор	Мероприятия и технические средства для минимизации влияния
мелкая, практически отсутствующая как явление стружка	корректировка режимов обработки, закрытая рабочая зона оборудования, система вытяжки и вентиляции оборудования, оснащенная системой фильтрации, применение биоразлагаемых смазывающих технологических средств и жидкостей
токсичные испарения смазывающих охлаждающих технологических средств и жидкостей при обработке	применение биоразлагаемых смазывающих технологических средств и жидкостей, применение системы вытяжки в паре с системой фильтрации, оснащение цехов системой пожаротушения, наличие в быстром доступе средств пожаротушения, обучение персонала работе со средствами пожаротушения
вибрации при обработке	применение гидроопор оборудования
травмоопасное оборудование	применение различного рода систем, изолирующих оператора от зон повышенной опасности, соблюдения оператором правильности применения средств индивидуальной защиты, контроль за соблюдением применения средств индивидуальной защиты, контроль за соблюдением техники безопасности

Комплекс мер, представленный в таблице 3 – поможет минимизировать негативное воздействие производственных факторов при процессе поверхностного пластического деформирования на здоровье человека, и окружающую среду.

4.3 Эффективность от внедрения средств и методов защиты

Внедрение какого-либо рода мероприятий или технических решений должно вести к повышению эффективности производства [53], в случае с разработкой какого либо нового устройства, вопрос безопасности так же должен рассматриваться при проектировании. Эффект от внедрения какого-либо мероприятия или технического решения следует оценивать по прошествии длительного периода, а на начальных этапах следует лишь оценивать возможные риски, связанные с восприятием персоналом различных нововведений. В рассматриваемом случае замены процесса шлифования, процессом отделочно-упрочняющей обработкой методом выглаживания возможно спрогнозировать эффект от внедрения. Например с точки зрения экологичности производства при комплексном подходе перехода на финишных операция на тип обработки методом поверхностного пластического деформирования, возможно полностью исключить снятие припуска, что помимо уменьшения материалоемкости детали, позволит фактически полностью исключить из технологического процесса отходы в виде стружки на финишных операциях, так же стоит отметить экологичность самого процесса , так как данный метод обработки не требует столь значительного объема смазывающих охлаждающих технологических средств и жидкостей

Заключение

В работе представлена актуальность проблемы исследования напряженно деформированного состояния деталей в машиностроении, проведено исследование поверхностного пластического деформирования, дана классификация основных и наиболее часто применяемых в машиностроении способов поверхностного пластического деформирования. В работе дана модель обработки поверхностным пластическим деформированием методом выглаживания, так же приведены значения остаточных напряжений, для определенной конструкционной стали при усилии выглаживания 200 Н. В работе также дано представление об увеличении долговечности деталей в машиностроении путем применения в технологическом процессе поверхностного пластического деформирования, а также описана возможность замены дорогостоящих легированных конструкционных сталей на более доступные нелегированные стали, путем внедрения обработки отдельных, наиболее нагруженных поверхностей поверхностным пластическим деформированием. Разработано универсальное устройство для поверхностного пластического деформирования, позволяющее производить обработку поверхностным пластическим деформированием внутренних и наружных поверхностей как в серийном цикле, так и для решения экспериментальных задач. Данное устройство так же проанализировано с точки зрения безопасности его применения на станках с числовым программным управлением. В качестве продолжения работы рассматривается вопрос проверки адекватности полученной модели на реальной детали. Также рассматривается расширение возможностей модели с целью учета предварительной шероховатости обрабатываемой поверхности, с возможностью внесения в нее предварительного микрорельефа, пример представлен на рисунке 45, где в зависимости от цвета меняется высота микронеровностей.

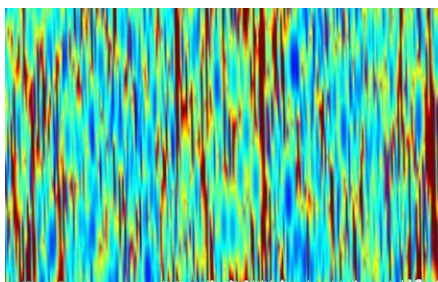


Рисунок 45 – Пример модели шероховатости [54]

Также в качестве продолжения рассматривается развитие устройства для поверхностного пластического деформирования методом оснащения его устройством сбора и анализа данных для комплексной работы оборудования и инструмента, при которой данные, полученные с устройства, будут мгновенно интегрироваться в работу оборудования и корректировать режимы обработки в реальном времени без участия человека в технологическом процессе. Данные исследования помогут нивелировать влияние износа инструмента до определенного момента, а также позволят мгновенно подстраивать работу оборудования под заготовки, имеющие нестабильные механические свойства от детали к детали. Решение данных задач в комплексе, позволит увеличить стабильность качества обрабатываемых поверхностей без дополнительного вмешательства в работу оборудования со стороны персонала предприятия.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Амельченко А.Г. Системы Управления И Элементы Усиливающего пьезоэлектрического актуатора для прецизионного позиционирования / А.Г. Амельченко, В.А. Бардин, В.А. Васильев // Известия Высших Учебных Заведений Поволжский Регион Технические Науки. – 2015, № 3 (35). – С. 111-124.
2. Амосов А.П. Тепловая теория воспламенения и горения: Учеб. пособие. Тепловая теория воспламенения и горения / А.П. Амосов, Б.С. Сеплярский. – Куйбышев: КПТИ, 1990. – 83 с.
3. Балла О.М. Инструментообеспечение современных станков с ЧПУ : учебное пособие / О.М. Балла. – СПб.: Издательство «Лань», 2017. – 200 с.
4. Бацукова Н.Л. Вредные профессиональные факторы при работе со смазочно-охлаждающими жидкостями и профилактика их неблагоприятного воздействия на работающих / Н.Л. Бацукова // Охрана Труда. – 2017, № 5 (143). – С. 68-74.
5. Берсудский А.Л. Технологическое обеспечение долговечности деталей машин на основе упрочняющей обработки с одновременным нанесением антифрикционных покрытий : докторская диссертация / А.Л. Берсудский. – Россия: —, 2007.
6. Бишутин С.Г. Обеспечение требуемой совокупности параметров качества поверхностных слоев деталей при шлифовании / С.Г. Бишутин // Сборник научных трудов 8-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием СОВРЕМЕННЫЕ ИННОВАЦИИ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ. – Курск: Издательство «Машиностроение-1», 2018. – С. 39-42.
7. Бобровский И.Н. Технология и оборудование финишной механической обработки деталей на основе моделирования процесса формирования требуемой текстуры поверхности : диссертация доктора технических наук /

И.Н. Бобровский. – Москва: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2023. – 371 с.

8. Бобровский Н.М. Инновационные технологии механической обработки деталей машин поверхностно-пластическим деформированием / Н.М. Бобровский, И.Н. Бобровский. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2018. – 80 с.

9. Бобровский Н.М. Определение площади износа рабочей поверхности деталей машин и инструментов / Н.М. Бобровский, И.Н. Бобровский, П.А. Мельников // Вектор Науки Тольяттинского Государственного Университета. – 2009, № 1 (4). – С. 17-23.

10. Бобровский Н.М. Теплообразование и распределение тепловых потоков при технологическом процессе выглаживания продольной подачей инструмента исключая СОЖ / Н.М. Бобровский, А.В. Савельев, И.Н. Бобровский // Высокие технологии в машиностроении. Материалы XVIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Самара: СГТУ, 2021. – С. 16-19.

11. Влияние пескоструйной обработки на усталостную долговечность поверхностей, обработанных на станках с ЧПУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.anebon.com/ru/news/impact-of-sandblasting-on-fatigue-life-of-cnc-machined-surfaces/>. – Дата доступа: 18.06.2025.

12. Голяс А.А. Применение смазочно-охлаждающих технологических средств для процессов алмазноговыглаживания / А.А. Голяс, Е.В. Соловьев, В.А. Полетаев. – Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2019. – С. 241-244.

13. Громанн Б. Патент №2413336 Российская Федерация, МПК H01L 41/083 (2006.01). Пакетный Пьезоэлемент И Пьезоэлектрический Привод С Таким Пакетным Пьезоэлементом: № 2008129372/28: заявл. 08.12.2006: опубл. 08.12.2006 / Б. Громанн, П. Констанцер, Ш. Шторм.

14. Девойно О. Г. Поверхностное упрочнение серого чугуна совмещенной лазерной и ультразвуковой обработкой [Электронный ресурс] / Девойно О. Г. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/poverhnochnoe-uprochnenie>

serogo-chuguna-sovmeschennoy-lazernoy-i-ultrazvukovoy-obrabotkoy/viewer. –

Дата доступа: 18.06.2025.

15. Евсин М.Г. Влияние Поверхностного Пластического Деформирования На Надежность И Долговечность Деталей Дорожно-Строительных Машин / М.Г. Евсин. – Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2018. – С. 62-67.

16. Евстифеев И.С. Оборудование и инструмент для алмазного выглаживания / И.С. Евстифеев // Евразийский Научный Журнал. – 2022, № 10. – С. 31-32.

17. Ежелев А.В. Анализ Способов Обработки Поверхностно-Пластическим Деформированием / А.В. Ежелев, И.Н. Бобровский, А.А. Лукьянов // Фундаментальные Исследования. – 2012, № 6-3. – С. 642-646.

18. Зайдес С.А. Влияние кинематики рабочего инструмента на качество деталей машин при поверхностном пластическом деформировании / С.А. Зайдес, Х.Х. Нгуен // Известия Высших Учебных Заведений Машиностроение. – 2024, № 6 (771). – С. 66-75.

19. Земляков А.М. Авт. свид. №963836 СССР, Устройство для выглаживания поверхностей деталей: №3210050/25-08: заявл. 01.12.80: опубл. 07.10.82 / А.М. Земляков, А.В. Березин.

20. Зубарев Ю.М. Моделирование процесса плоского шлифования однослойными эльборовыми кругами / Ю.М. Зубарев, И.Д. Теннисон // Шлифабразив 2001. Сб. статей Международной научно-технической конференции. – Волжский: ВолгГАСА, 2001. – С. 284-286.

21. Зубофрезерование цилиндрических колес методом обката без применения СОЖ / А.С. Калашников [и др.] // Вестник Машиностроения. – 2018, № 4. – С. 73-77.

22. Ковальногов В.Н. Алмазное Выглаживание Заготовок С Предварительной Ультразвуковой Релаксацией Остаточных Напряжений / В.Н. Ковальногов // Прогрессивные Технологии И Системы Машиностроения. – 2005, № 1 (30). – С. 105-110.

23. Ковальногов В.Н. Алмазное выглаживание с малым силовым воздействием на обрабатываемую поверхность / В.Н. Ковальногов // Стин. – 2009, № 4. – С. 36-39.
24. Кузнецов В.П. Патент № 114 433 Российская Федерация, МПК В24В 39/00 (2006.01). Выглаживающий инструмент. №2011145345/02: заявл. 08.11.2011: опубл. 27.03.2012// В.П. Кузнецов, В.Г. Горгоц.
25. Кургузов С.А. Разработка Устройства С Автоматической Регулировкой Усилия Индентора Для Выглаживания / С.А. Кургузов, А.А. Капленко // Обработка Сплошных И Слоистых Материалов. – 2011, № 37. – С. 100-104.
26. Максаров В.В. Технологическое обеспечение шероховатости поверхностного слоя на основе моделирования переходных процессов / В.В. Максаров, Р.В. Вьюшин, А.Е. Ефимов // Металлообработка. – 2017, № 2 (98). – С. 39-45.
27. Малышев В.И. Ультразвуковая отделочно-упрочняющая обработка сферическим индентором / В.И. Малышев, А.С. Петрова, А.С. Селиванов // Механики Ххi Веку. – 2013, № 12. – С. 149-152.
28. Папшев Д.Д. Технологические основы повышения надежности и долговечности деталей машин поверхностным упрочнением / Д.Д. Папшев. – Самара: Самарский государственный технический университет, 1993. – 74 с.
29. Патент 2533 Российская Федерация, МПК В24В 39/04 (1995.01). Деформирующее устройство: №9404277/20 заявл. 23.11.1994: опубл. 16.08.1996 / А.В. Киричек [и др.].
30. Патент №2303512 Российская Федерация, МПК В24В (2006.01) Комбинированный Алмазно-Абразивно-Выглаживающий Инструмент: №2005133929/02: заявл. 02.11.2005: опубл. 27.07.2007 / Ю.С. Степанов [и др.].
31. Петренко К.П. Исследование влияния режимов алмазного выглаживания на качество поверхности деталей центробежных насосов / К.П. Петренко // Вестник Кузбасского Государственного Технического Университета. – 2023, № 4 (158). – С. 36-48.

32. Петросов В.В. Гидродробеструйное упрочнение деталей и инструмента / В.В. Петросов. – Москва: Машиностроение, 1977. – 166 с.
33. Повышение долговечности деталей электронасосов путем проведения комбинированного упрочнения – тема научной статьи по технологиям материалов читайте бесплатно текст научно-исследовательской работы в электронной библиотеке КиберЛенинка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-dolgovechnosti-detaley-elektronasosov-putem-provedeniya-kombinirovannogo-uprochneniya>. – Дата доступа: 02.12.2024.
34. Разработка Программно-Аппаратного Комплекса Автоматизации Электромонтажных Работ / Р.В. Волков [и др.] // Нанотехнологии Наука И Производство. – 2023, № 6. – С. 14-20.
35. Самойлова Е.М. Системный подход к анализу методов управления точностью прецизионной обработки с учетом доминирующей роли формообразующих перемещений / Е.М. Самойлова, С.С. Колоколова, М.В. Виноградов // Вестник ПНИПУ Саратовский Государственный Технический Университет Им ЮА Гагарина. – 2016. – Т. 18, № 1.
36. Скуратов Д.Л. Теплофизика Процесса Алмазного Выглаживания / Д.Л. Скуратов, А.Н. Швецов, А.Д. Веколов // Известия Самарского Научного Центра Российской Академии Наук. – 2020. – Т. 22, № 4 (96). – С. 34-40.
37. Сулейманов (Сейтумерова) Р.И. Оценка Эффективности Влияния Механической Активации Сотс На Силы Резания При Обработке Бронзовых Сплавов / Р.И. Сулейманов (Сейтумерова), Р.Р. Сулейманов, Р.Т. Мухтаров. – 2018. – С. 8-14.
38. Тихонов Д.А. Повышение стойкости режущих инструментов с износостойким покрытием путем отделочно-упрочняющей обработки их рабочих поверхностей алмазным выглаживанием: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.03.01. Повышение стойкости режущих инструментов с износостойким покрытием путем отделочно-упрочняющей

обработки их рабочих поверхностей алмазным выглаживанием / Д.А. Тихонов. – Саратов, 2009. – 16 с.

39. Ультразвуковое Поверхностное Пластическое Деформирование / В.Ф. Казанцев [и др.] // Вестник Харьковского Национального Автомобильно-Дорожного Университета. – 2009, № 46. – С. 7-9.

40. Устройство для алмазного выглаживания шеек коленчатых валов / В.В. Корнев [и др.].

41. Хоанг Н.А. Оценка микротвердости деталей машин при поверхностном пластическом деформировании с разной кинематикой тороидального ролика / Н.А. Хоанг, Х.Х. Нгуен, Зайдес С.А. // Современные Материалы Техника И Технологии. – 2023, № 5. – С. 91-96.

42. Чекин Г.И. Особенности процесса алмазного выглаживания / Г.И. Чекин // Труды Иркутского Политехнического Института. – 1967, № 36. – С. 23-25.

43. Швецов А.Н. Устройство Для Алмазного Выглаживания Отверстий С Нагружением Выглаживателя Центробежной Силой / А.Н. Швецов, Д.Л. Скуратов, С.Р. Абульханов // Вестник Самарского Государственного Аэрокосмического Университета Им Академика Сп Королёва Национального Исследовательского Университета. – 2011, № 3-1 (27). – С. 118-122.

44. Шлифование поверхностей с покрытиями, сформированными электромагнитной наплавкой с пластическим деформированием – тема научной статьи по механике и машиностроению читайте бесплатно текст научно-исследовательской работы в электронной библиотеке КиберЛенинка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/shlifovanie-poverhnostey-s-pokrytiyami-sformirovannymi-elektromagnitnoy-naplavkoj-s-plasticheskim-deformirovaniem>. – (Дата обращения: 12.02.2025).

45. Яндекс Картинки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://yandex.ru/images/search?from=tabbar&img_url=https%3A%2F%2Fstatic.tildacdn.com%2Ftild3734-6536-4063-b134-653833663065%2F1d0fb8c9d256ee99c13e.png&lr=240&p=1&pos=16&rpt=sima

ge&text=%D1%82%D0%BE%D0%BA%D0%B0%D1%80%D0%BD%D1%8B%D0%B9%20%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%BA%20%D1%81%20%D1%87%D0%BF%D1%83. (Дата обращения: 11.02.2025).

46. Livatyali H. Prediction of residual stresses in ball burnishing Ti6AL4V thin sheets / H. Livatyali, E. Has, M. Türköz // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2020. – Vol. 110, № 3-4. – P. 1083-1093.

47. Majzoobi G.H. The effects of deep rolling and shot peening on fretting fatigue resistance of Aluminum-7075-T6 / G.H. Majzoobi, K. Azadikhah, J. Nematì // Mater. Sci. Eng. A. – 2009. – T. 516, № 1. – С. 235-247.

48. Meyer, D. Sustainable approach of heat treatment-free surface hardening by deep rolling / D. Meyer, J. Kämmler // Int. J. Sustain. Manuf. – 2018. – Vol. 4, № 1. – P. 64.

49. Plastic–elastic Model for Water-based Lubrication Considering Surface Force | Chinese Journal of Mechanical Engineering | Full Text [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cjme.springeropen.com/articles/10.1186/s10033-022-00785-2>. (дата доступа: 18.02.2025).

50. Salahshoor M. Process Mechanics in Deep Rolling of Magnesium-Calcium (MgCa) Biomaterial / M. Salahshoor, Y.B. Guo // ASME 2011 International Manufacturing Science and Engineering Conference, Volume 1 ASME 2011 International Manufacturing Science and Engineering Conference. – Corvallis, Oregon, USA: ASMEDC, 2011. – С. 303-311.

51. sensotronicsystem.tradeindia.com/safety-light-curtains-1039230.html [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sensotronicsystem.tradeindia.com/safety-light-curtains-1039230.html>. (Дата обращения: 19.03.2025).

52. Studies and Optimization of Surface Roughness and Residual Stress in Ball Burnishing of Ti60 Alloy / K. Han [et al.] // J. Mater. Eng. Perform. – 2022. – Vol. 31, № 5. – P. 3457-3470.

53. The inducement of residual stress through deep rolling of AISI 1060 steel and its subsequent relaxation under cyclic loading / A.M. Abrão [et al.] // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2015. – Vol. 79, № 9-12. – P. 1939-1947.
54. Wear resistance and friction analysis of Ti6Al4V cylindrical ball-burnished specimens with and without vibration assistance / E. Velázquez-Corral [et al.] // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2024. – Vol. 131, № 2. – P. 551-562.