

Министерство образования науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

Факультет Механико-технологический

Кафедра Технологии автоматизированного машиностроения

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент, руководитель
группы АО «ПГ «МЕТРАН»

_____ А.А. Черновол
_____ 2018 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой, д.т.н.,
профессор

_____ В.И. Гузеев
_____ 2018 г.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
ПРИ ГИДРОДРОБЕСТРУЙНОМ УПРОЧНЕНИИ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ–15.04.05.2018.582.00 ПЗ ВКР

Руководитель работы,
д.т.н., профессор,

_____ П.Г. Мазеин
_____ 2018г.

Автор работы
студент группы П-261

_____ Д.В. Беликов
_____ 2018 г.

Нормоконтролер,
к.т.н., доцент

_____ И.В. Шмидт
_____ 2018 г.

АННОТАЦИЯ

Беликов Д.В. Прогнозирование остаточных напряжений при гидродробеструйном упрочнении.

– Челябинск: ЮУрГУ, П-261, 113 с., 41 ил., 1 табл., библиогр. список – 36 наим., 3 прил.

Выпускная квалификационная работа выполнена с целью повышения эффективности гидродробеструйного упрочнения на основе взаимодействия многократных ударов шариков, учитывающих режимы обработки и приспособляемость материала заготовки.

В выпускной квалификационной работе исследована сущность гидродробеструйной обработки, разработана математическая модель процесса упрочнения, установлены взаимосвязи между однократным ударом и многократным взаимодействием шара, разработана установка для гидродробеструйного упрочнения.

15.04.05.2018.582.00 ПЗ

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Беликов Д.В.			Прогнозирование остаточных напряжений при гидродробеструйном упрочнении	Лит.	Лист	Листов
Провер.		Мазеин П.Г.				В	6	113
Реценз.		Черновол А.А.				ЮУрГУ, Кафедра ТАМ		
Н. Контр.		Шмидт И.В.						
Утверд.		Гузеев В.И.						

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	9
1 ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ	12
1.1 Сущность гидродробеструйного способа упрочнения	12
1.2 Влияние остаточных напряжений и наклепа на повышение долговечности деталей машин	13
1.3 Связь технологических параметров и режимов упрочнения.....	18
1.4 Расчет остаточных напряжений при дробеструйном упрочнении.....	23
1.5 Приспособляемость материала при упрочнении	26
Выводы по разделу.....	30
2 РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ.....	32
2.1 Описание процесса формирования остаточных напряжений	32
2.2 Модель однократного удара.....	44
2.3 Допущения модели однократного удара.....	50
2.3.1 Влияние динамических факторов.....	50
2.3.2 Влияние шероховатости.....	51
2.4 Анализ уравнений приспособляемости	52
Выводы по разделу.....	60
3 ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ УПРОЧНЕНИЯ.....	61
3.1 Общие принципы построения модели	61
3.2 Расчет однократного взаимодействия.....	62
3.2.1 Выбор численного метода и алгоритм.....	62
3.2.2 Результаты расчета и сравнение с экспериментальными данным.....	69

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

3.3 Расчет с учетом уравнений приспособляемости.....	73
3.4 Влияние механизмов приспособляемости на процесс упрочнения	77
3.5 Анализ численных расчетов.....	79
Выводы по разделу.....	80
4 РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ ДЛЯ ГДУ. ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ГДУ	81
4.1 Разработка установки для гидродробеструйного упрочнения.....	81
4.1.1 Описание и принцип работы установки для ГДУ	81
4.1.2 Разработка инструкции работы с установкой	85
4.1.3 Анализ и расчет вероятности отказа установки для ГДУ.....	87
4.2 Разработка вероятностной модели	91
4.2.1 Влияние расхода шариков на остаточные напряжения	92
4.2.2 Влияние кинетической энергии шариков на разброс остаточных напряжений.....	96
4.2.3 Влияние свойств материала на остаточные напряжения.....	98
4.2.4 Определение функции чувствительности	100
4.3 Алгоритм расчета погрешностей.....	101
Выводы по разделу.....	101
ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ	103
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ	104
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	105
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	109
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Изображения установки для ГДУ.....	109
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Блок схема наладки и запуска установки.....	111
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Уведомление о регистрации заявки на патент	113

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует большое количество способов повышения долговечности деталей машин методами поверхностного пластического деформирования (ППД). Наиболее широкое применение в промышленности получили методы обкатывания, виброупрочнения, ультразвуковой обработки, выглаживания, дробеструйного упрочнения (ДУ). Однако для упрочнения деталей, имеющих сложный фасонный профиль, наиболее эффективно применение методов упрочнения дробью, которые позволяют обрабатывать профили практически любой конфигурации без создания специальных оснасток для каждого типоразмера деталей. Вследствие этого методы дробеструйного упрочнения являются универсальными и недорогими в эксплуатации. Способ особенно эффективен, когда детали имеют концентраторы напряжений, при этом чувствительность деталей к концентрации напряжений может быть снижена в 1,5 – 2 раза. После поверхностного упрочнения дробью срок службы детали повышается в 2 – 4 раза и создается возможность повышения ресурса всего изделия, при том же ресурсе можно в 1,5 и более раз повысить выносливость, обеспечивая конструктору право или повысить мощность изделия, или снизить металлоемкость данной детали.

Однако практика внедрения дробеструйного упрочнения в качестве отделочно-упрочняющей операции сдерживается несовершенством методик проектирования технологических процессов, основанных на использовании узкодиапазонных эмпирических зависимостей, это приводит к удлинению сроков подготовки производства, неправильному назначению режимов обработки и в результате этого к снижению качества изготовленных деталей. Поэтому разработка теоретически обоснованных рекомендаций и методик по проектированию технологических процессов дробеструйного упрочнения, обеспечивающих качественные параметры деталей, а именно: шероховатость и заданные остаточные напряжения в поверхностном слое являются актуальной задачей машиностроения.

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
						9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Данная выпускная квалификационная работа посвящена изучению остаточных напряжений в поверхностном слое в зависимости от режимов гидродробеструйного упрочнения (ГДУ) (кинетической энергии упрочнения, расхода шариков, времени упрочнения). При этом учитывалось, что известны характеристики материала (твердость, шероховатость, способность к наклёпу). Получены расчетные зависимости и теоретические обоснованные рекомендации, которые могут быть использованы при проектировании технологических процессов гидродробеструйного упрочнения деталей машин. В работе на основе решения упругопластических задач определены теоретические зависимости, выражающие прямую физическую связь между остаточными напряжениями и режимами упрочнения.

На основании полученных уравнений разработана вероятностная модель упрочнения, учитывающая разброс характеристик материала, режимов упрочнения, погрешности численных расчетов и приборов измерения. Это позволило более точно установить доверительные интервалы эпюр остаточных напряжений и дало возможность на стадии проектирования разрабатывать более надёжные технические операции ГДУ.

Актуальность темы определяется необходимостью постоянного повышения качества поверхностного слоя деталей машиностроения и неточностью моделей формирования напряженного состояния поверхности при гидродробеструйном упрочнении.

Целью работы является повышение эффективности гидродробеструйного упрочнения на основе взаимодействия многократных ударов шариков, учитывающих режимы обработки и приспособляемость материала заготовки.

Для осуществления поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- исследовать сущность гидродробеструйной обработки;
- разработать математическую модель процесса ГДУ, учитывающую приспособляемость материала при обработке;

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

- установить взаимосвязи между однократным ударом и многократным взаимодействием шара с полупространством;
- установить зависимости между остаточными напряжениями и режимами упрочнения;
- разработать установку для ГДУ.

Объектом исследования является гидродробеструйное упрочнение, предметом исследования – остаточные напряжения.

В ходе работы над диссертацией опубликовано 2 статьи в сборник «Прогрессивные технологии в машиностроении». Для получения патента на полезную модель была оформлена и сдана в Федеральный институт промышленной собственности (ФИПС), уведомление о приеме регистрации № 2018112206 находится в приложении В.

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

1 ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

1.1 Сущность гидродробеструйного способа упрочнения

Качественная характеристика современной продукции машиностроения должна оцениваться работоспособностью и долговечностью при низкой себестоимости изделия и малом расходе металла. Критерием оценки качества каждой детали являются, не только точность, выдерживаемого размера, и шероховатость поверхности, но и физико-механические свойства поверхностного слоя: остаточные напряжения, наклёп, микрогеометрия, которые обеспечивают надежность и работоспособность детали и всего изделия. В области технологии машиностроения требуется непрерывное совершенствование не только процессов, обеспечивающих точность размеров и формы деталей, но и придание, поверхностному слою, необходимых физико-механических свойств.

Обработка дробью – эффективный и распространенный технологический метод повышения выносливости и износостойкости поверхностным пластическим деформированием деталей, определяющих надежность работы изделий. Главной особенностью этого метода является его универсальность, т.е. можно обрабатывать любые сложные поверхности, например, такие, как зубья шестерен, витые пружины, рессоры. Обработку дробью широко применяют и для упрочнения режущего инструмента из быстрорежущих сталей и твердых сплавов, значительно повышая его износостойкость, тем самым обеспечивая экономию ценного металла или рост производительности труда за счет повышения режимов резания.

Существенным вкладом в развитие универсального метода упрочнения ППД – обработка дробью, оказалось упрочнение дробью с применением смазывающе-охлаждающей жидкости, которое получило первое практическое внедрение в промышленности с 1958 году в виде пневмогидродробеструйных установок, предназначенных для упрочнения лопаток компрессора из титанового

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

работа и происходит разрушение материала у её краев. Отсюда следует, что если в материале имеются остаточные сжимающие напряжения, то при их суммировании с напряжениями, возникающими от рабочих нагрузок на деталь, суммарные растягивающие напряжения уменьшатся, и тем самым будет обеспечиваться замедление роста трещин.

$$\sigma'_{\max} = \sigma_{\max}^m + \sigma^{\text{ост}}, \quad (1.2)$$

где $\sigma^{\text{ост}}$ – остаточные сжимающие напряжения;

σ'_{\max} – суммарные растягивающие напряжения.

Подставляя (1.2) в (1.2) получим:

$$\frac{dl}{dN} = A \cdot (\sigma'_{\max} + \sigma^{\text{ост}}) \cdot (1 - R)^m \cdot \alpha^m \cdot (\pi \cdot l)^{m/2}. \quad (1.3)$$

Анализируя зависимость (1.3) можно сделать вывод, что замедление роста трещин линейно зависит от роста сжимающих напряжений. Поэтому, формируя в поверхностном слое сжимающие напряжения, можно существенно повысить долговечность деталей.

Большинство деталей машин работают с переменными циклами нагружения. Зависимость между остаточными напряжениями и временем при таком нагружении показана на рисунке 1.1. Благодаря остаточным сжимающим напряжениям в детали, пульсирующий цикл смещается в сторону остаточных сжимающих напряжений как показано на рисунке.

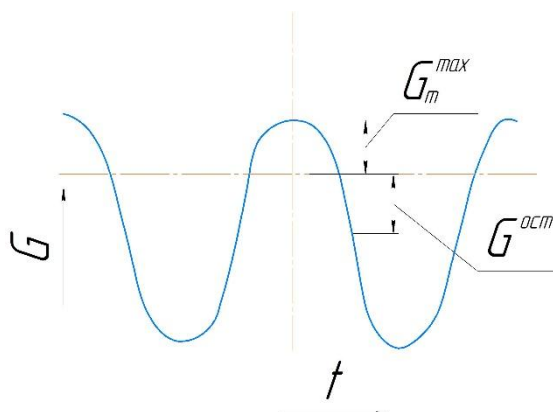


Рисунок 1.1 – Зависимость между напряжениями и временем

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15

В работе [5] сделана попытка оценить влияние остаточных напряжений на долговечность при помощи коэффициентов влияния $K_{\sigma u}$ и $K_{\sigma k}$. Учитывая эти коэффициенты, пределы выносливости на изгиб и контактную прочность можно рассчитать по формулам:

$$\sigma_f^u = \frac{\sigma_p^u}{K_{\sigma u}}; \quad (1.4)$$

$$\sigma_f^k = \frac{\sigma_p^k}{K_{\sigma k}}, \quad (1.5)$$

где σ_f^u и σ_f^k – пределы выносливости на изгиб и контактную прочность.

Для остаточных напряжений в [5] приводятся следующие формулы:

$$K_{\sigma u} = 1 + 4 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma^{\text{ост}}; \quad (1.6)$$

$$K_{\sigma k} = 1 + 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma^{\text{ост}}, \quad (1.7)$$

где $\sigma^{\text{ост}}$ – сжимающие остаточные напряжения в материале.

Как видно из (1.6, 1.7) здесь прослеживается линейная зависимость между долговечностью и остаточными сжимающим напряжениями.

Не менее важное влияние на долговечность упрочненных материалов оказывает наклеп материала. Для приближенной оценки изменения пределов выносливости в зависимости от степени наклёпа, без учёта остаточных напряжений в материале, в работах [6-8] рекомендуют диаграммы выносливости строить по диаграммам распределения, предполагая, что выполняется соотношение:

$$\frac{\sigma_{f.\text{накл}}^u}{\sigma_{f.\text{исх}}^u} = \frac{H_{\text{накл}}}{H_{\text{исх}}}, \quad (1.8)$$

где $H_{\text{накл}}$ и $H_{\text{исх}}$ – твердость в исходном и наклёпанном состояниях.

Для комплексного учета влияния остаточных напряжений и твердости материала на долговечность в [6-8] предлагается строить графики выносливости материала по исходным эпюрам твердости и остаточных напряжений. Для этого

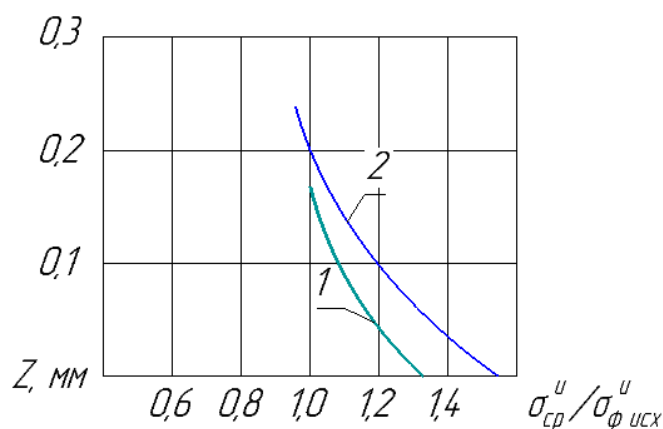


Рисунок 1.3 – Диаграмма для комплексной оценки долговечности:
 1 – предел выносливости с учетом наклёпа, 2 – предел выносливости с учётом наклёпа и остаточных напряжений

Значительное влияние остаточных напряжений на долговечность заставляет конструкторов авиационного и ряда других отраслей промышленности оговаривать их в технических условиях на чертежах. Использование остаточных напряжений, в качестве одного из критериев долговечности, положено в основу расчета на прочность при переменных нагружениях.

Таким образом, распределение технологических остаточных напряжений является одним из основных факторов, определяющих качество поверхностного слоя деталей машин.

1.3 Связь технологических параметров и режимов упрочнения

Связь между технологическими параметрами (остаточные напряжения, шероховатость, микроструктура) и режимами упрочнения (скорость полёта шариков, диаметр шариков, расход шариков) при ДУ подробно рассмотрены в работах [1, 15]. В частности, приводится следующая зависимость между глубиной наклёпа и режимами упрочнения:

$$h_{\text{накл}} = \frac{D \cdot V \cdot \sin \alpha}{\sqrt{H_{\text{м.дин}}}} \cdot k, \quad (1.9)$$

где $h_{\text{накл}}$ – глубина наклёпанного слоя;

D – диаметр шариков;

V – скорость полёта шариков;

$H_{м,дин}$ – динамическая твёрдость;

k – коэффициент пропорциональности.

Из формулы (1.9) видно, что глубина наклёпа, которая играет решающую роль в эффективности дробеструйного процесса упрочнения, прямо пропорциональна скорости полёта дроби, её диаметру и обратно пропорциональна корню квадратному из динамической твердости материала.

Наряду с глубиной наклёпа, большое влияние на эффективность упрочнения оказывают форма эпюры остаточных напряжений, которая характеризуется величиной максимальных сжимающих напряжений, глубиной их расположения, размером сжатого слоя. Из рисунка 1.4 видно, что с ростом твердости пластин, заметно растёт величина максимальных сжимающих напряжений наклёпанном слое и уменьшается глубина сжимаемого слоя.

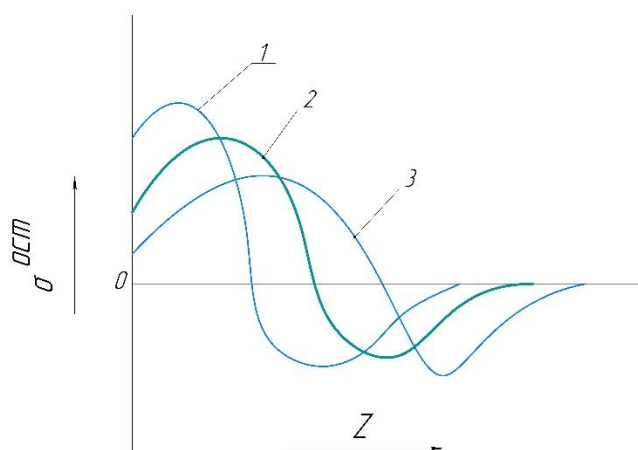


Рисунок 1.4 – Характер распределения остаточных напряжений в зависимости от твердости материала: 1 – 57 HRC, 2 – 46 HRC, 3 – 25HRC

Исследованием формы эпюры остаточных напряжений и ее зависимости от режимов упрочнения занимались [1, 15, 16] и многие другие авторы. Например, в работе [16] экспериментально исследовано распределение напряжений в призматических образцах, изготовленных из нормализованной стали Ст 5. Результаты измерения остаточных напряжений показаны на рисунке 1.5. Как видно из рисунка, на поверхности возникают большие растягивающие

напряжения, которые затем на глубине 0,015-0,2 мм переходят в сжимающие, с образованием подслоного максимума сжимающих напряжений.

По поводу механизма образования тонкого поверхностного слоя растягивающих напряжений, до сих пор, не существует единого мнения. Например, в работе [15] образование растягивающих напряжений объясняется следующей причиной: в момент соударения, летящего шарика с поверхностью детали, происходит активное деформирование поверхностного слоя под зоной контакта, в результате чего, реально площадь поверхности увеличивается, а это в свою очередь приводит к появлению растягивающих напряжений. В работе [1] формирование растягивающих напряжений объясняется термопластическими напряжениями, которые возникают из-за наличия зоны пластических деформаций под шариком.

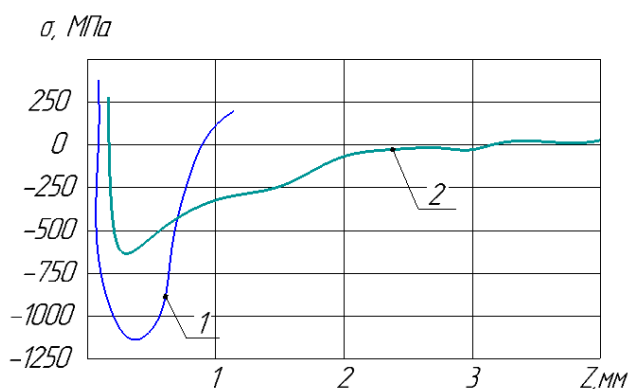


Рисунок 1.5 – Результаты замера остаточных напряжений в прямоугольных образцах из стали Ст 5

Однако все эти объяснения носят в основном качественный характер из-за сложности математического описания процессов ДУ.

Обобщая вышесказанное, в эпюре остаточных напряжений (рисунок 1.6) можно выделить три участка:

- 1) растягивающие напряжения в поверхностном слое;
- 2) сжимающие напряжения с максимумом на глубине 0,1-0,4 мм;
- 3) растягивающие напряжения, которые постепенно сходят к нулю.

Так как растягивающие напряжения способствуют росту трещин, то необходимо стремиться к сокращению зон (1), (3) и увеличению зоны (2) (рисунок 1.6). Необходимо также стремиться, чтобы максимум сжимающих напряжения при изгибных нагрузках находился как можно ближе к рабочей поверхности детали, там, где находится наибольшее рабочее напряжение.

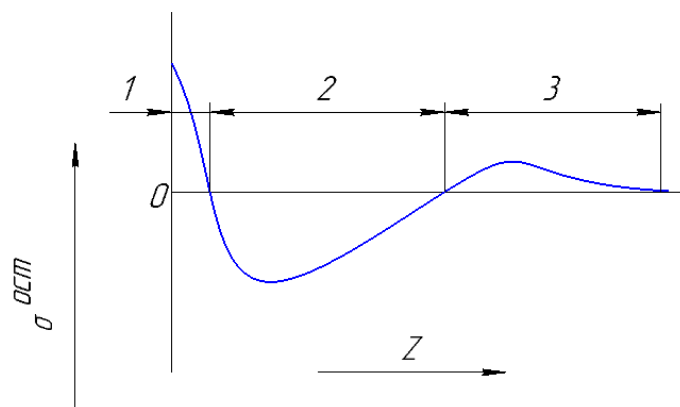


Рисунок 1.6 – Характерный вид эпюры остаточных напряжений

Косвенное влияние режимов упрочнения на остаточные напряжения можно оценить по прогибу прямоугольных пластин. Известно, что прогиб пластин прямо пропорционален остаточным напряжениям [14, 17]. Поэтому, измеряя прогиб f_p , можно однозначно оценить влияние режимов упрочнения на остаточные напряжения в пластине.

Условно зависимость между прогибом пластин и временем упражнения можно разделить на три фазы (рисунок 1.7):

- 1) – фаза линейного роста остаточных напряжений;
- 2) – переходный участок;
- 3) – фаза насыщения.

Первая фаза характерна отсутствием наклёпа материала, что приводит к линейному сложению остаточных напряжений от каждого отпечатка. Вторая и третья фазы характеризуются сильными структурными изменениями поверхностных слоев, сжимающими остаточными напряжениями и наклёпом. На данном этапе начинают действовать механизмы приспособляемости материала. Это приводит к уменьшению с течением времени зоны пластической деформации

при контакте шара с поверхностью и замедлению роста остаточных напряжений.

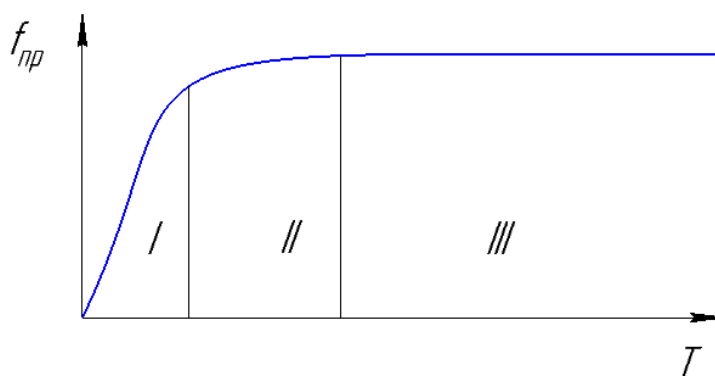


Рисунок 1.7 – Влияние времени упрочнения на прогиб пластин

Наряду с остаточными напряжениями, режимы упрочнения оказывают влияние на наклёп и шероховатость поверхности. Исследования многих авторов [1, 12, 13, 18, 19] показывают, что влияние ГДУ на шероховатость неоднозначно. Это влияние, как правило, зависит от исходной шероховатости и твердости. Например, в [20] показано, что при шероховатости в диапазоне $Ra = 0,2 \dots 0,4$ мкм для образцов, подвернутых закалки, как правило происходит снижение шероховатости, причём из всех методов ГДУ дает лучшие результаты. Это объясняется сравнительно мягкими режимами упрочнения ($V = 4 - 8$ м/с), а также присутствием масляной плёнки на поверхности упрочняемой детали. Однако, при жёстких режимах упрочнения ($V = 8 - 16$ м/с), и мягких материалах ($HRC = 35$) ГДУ может ухудшить шероховатость относительно исходной.

Дробеструйное упрочнение повышает твердость поверхностных слоев детали, это отмечено в исследованиях [11, 17]. Особенно заметен рост твердости для мягких материалов ($HRC = 20 - 30$), для которых он составил от 20% до 100% в зависимости от режимов упрочнения и марки материала. На рисунке 1.8 изображено приращение твердости упрочненных образцов. Видно, что наибольший прирост твердости происходит в поверхностном слое, где возникают наибольшие пластические деформации.

Обобщая вышесказанное, можно утверждать, что режимы упрочнения активно воздействует на технологические параметры, однако связь между ними

изучена, в основном, на эмпирическом уровне, в виду сложности упрочнения и больших разброса характеристик материала.

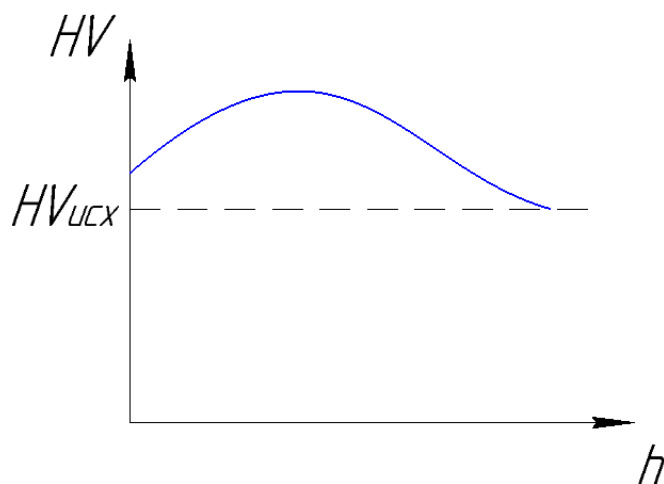


Рисунок 1.8 – Влияние ДУ на твердость упрочненного материала

1.4 Расчет остаточных напряжений при дробеструйном упрочнении

Расчетное определение остаточных напряжений является сложной математической задачей. Для точного её решения необходимо привлекать уравнения теории упругости. Кроме того, отсутствие решения в конечном виде для упругопластических контактных задач, делает данную проблему еще более трудноразрешимой. Однако, если ввести в модель формирования остаточных напряжений ряд допущений, основанных на экспериментальных исследованиях, то можно создать методику, пригодную для использования при технологическом проектировании операций ДУ. Наиболее полная методика расчета остаточных напряжений, реализующая такой подход, предложена в работе [14, 17]. Основные моменты этой методике излагаются ниже.

В основе расчёта лежит способ определение остаточных деформаций на оси симметрии отпечатка. При этом предполагается, что максимальные деформации возникают на поверхности отпечатка, и их можно найти из соотношения:

$$(\epsilon_{\max}^{\text{ост}})_{ZZ} = -2 \frac{h}{h_{\text{пл}}}, \quad (1.10)$$

где h – глубина лунки;

$h_{пл}$ – глубина зоны контакта.

Если поменять линейный закон распределения остаточных напряжений (рисунок 1.9), то можно получить формулу для определения остаточных осевых деформаций в любые точке, лежащей на оси симметрии отпечатка:

$$\epsilon_{ZZ}^{ост} = -2 \frac{h}{h_{пл}} \cdot \left(1 - \frac{z}{h_{пл}}\right); \quad (1.11)$$

Так как на оси симметрии выполняется условие:

$$\epsilon_{XX}^{ост} = \epsilon_{YY}^{ост} = \epsilon_{ZZ}^{ост}/2 \quad (1.12)$$

и учитывая закон Гука, можно получить распределение остаточных напряжений в упругой области:

$$\sigma_{XX}^{ост} = \frac{E}{1 - \mu} \epsilon_{XX}^{ост}, \quad \text{при } \epsilon_S \geq \epsilon_U > 0, \quad (1.13)$$

где ϵ_S – предельные упругие деформации;

ϵ_U – интенсивность деформаций.

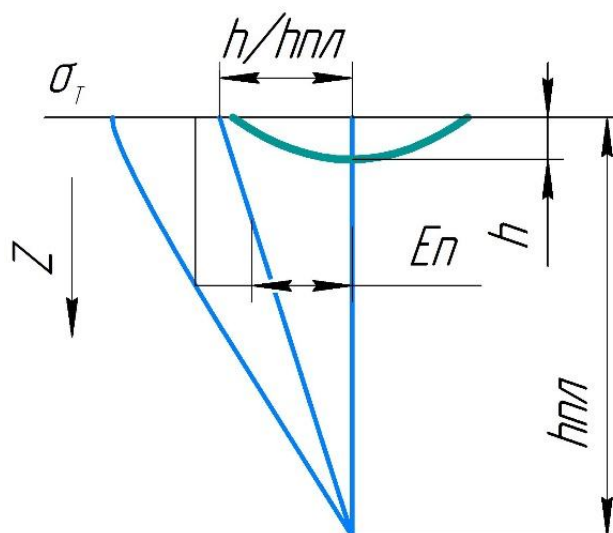


Рисунок 1.9 – Распределение остаточных деформаций и напряжений по оси симметрии отпечатка

В пластической области зависимость между остаточными напряжениями и деформациями аппроксимируется степенным законом, поэтому здесь можно записать:

$$\sigma_{XX}^{\text{ост}} = -K_{\Pi} \cdot \epsilon_{XX}^{\text{ост}n}, \quad \text{при } \epsilon_S < \epsilon_U, \quad (1.14)$$

где K_{Π} и n – коэффициенты и пластичности материала.

Рассчитанные таким способом остаточные напряжения справедливы для точек, лежащих на оси симметрии отпечатка. Для того чтобы распространить справедливость формул (1.13) и (1.14) на любую точку упрочняемого слоя, делают следующие допущение: при насыщении поверхности отпечатками, остаточные напряжения в любой точке стремятся к остаточным напряжениям на оси симметрии отпечатка. Исходя из этого допущения, авторы находят время упрочнения детали. Иначе говоря формулы (1.13) и (1.14) справедливы только для какого-то времени T . Это время определяется по формуле:

$$T = n_y / (q \cdot \Delta S), \quad (1.15)$$

где q – расход шариков на единицу поверхности;

n_y – среднее количество попаданий шарика на площадку за время T .

$$\Delta S = \pi \cdot d^2 / 4, \quad (1.16)$$

где d – диаметр отпечатка.

Если $n_y = 6$, то поверхность выпадения хотя бы одного шарика на площадку ограниченную площадью ΔS равна 99%, что гарантирует насыщение упрочняемой поверхности отпечатками.

Несмотря на сложную задачу упругопластического деформирования материала дробью, авторам удалось, благодаря ряду допущений, вывести конечные формулы для остаточных напряжений, что значительно упрощает расчет технологических параметров упрочнения.

Однако, несмотря на эти преимущества, выше указанный подход обладает следующими недостатками:

– исходя из реального процесса упрочнения технологические параметры материала явно зависят от времени упрочнения и таким образом все формулы должны включать время в качестве исходного параметра, что в [17] отсутствует;

– время упрочнения определяется степенью равномерности покрытия поверхности отпечатка, что не совсем корректно, так как все режимы упрочнения, в том числе и время, должны определяться из требуемых остаточных напряжений и твердости;

– для учёта многократности и взаимодействий шариков с материалом в [17] вводится поправочный коэффициент. Однако этот коэффициент определяется из условия многократного удара шарика по одному и тому же месту, в реальном же процессе упрочнения это никогда не происходит, шарики неравномерно распределяются по всей поверхности, при этом места контакта непрерывным и хаотичным образом меняются с течением времени;

– форма эпюры остаточных напряжений задаётся априорно исходя из опытных данных или каких-то дополнительных соображений, хотя форма кривой упрочнения должна целиком определяться режимами упрочнения и исходными параметрами материала.

– в данной методике не учтены механизмы приспособляемости материала, которые явно проявляются в процессе упрочнения и приводят к постепенному снижению эффективности дробеструйного упрочнения.

– отсутствует вероятностный анализ технологических параметров, который необходим из-за наличия разброса характеристик материала, режимов упрочнения, что в свою очередь приводит к существенному разбросу остаточных напряжений. Поэтому, данная методика эффективна в некоторых случаях, не отражает физической сущности процесса упрочнения, что может серьезно ограничить её применение.

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26

1.5 Приспособляемость материала при упрочнении

Приспособляемость материала играет ведущую роль при многократном упругопластическом деформировании материала [21]. Для всех методов ДУ характерно многократное контактное взаимодействие шариков с упрочняемой поверхностью. Поэтому, для полного описания процесса ДУ, необходимо рассматривать механизмы приспособляемости материала при упрочнении. Под приспособляемостью материала при дробеструйном упрочнении понимается его способность адаптироваться к внешним нагрузкам, возникающим при взаимодействии шариков с поверхностью.

С физической точки зрения, приспособляемость характеризуется уменьшением зоны пластичности, при многоцикловом нагружении, под областью контакта шарика с поверхностью, которая происходит, очевидно, по двум причинам:

- наведение остаточных напряжений в материале, которые суммируясь с напряжениями в области контакта приводят к изменению зоны пластичности;
- явление наклепа, которое сопровождается повышением твердости материала и ведет к сокращению зоны пластичности.

Эти физические явления рассмотрены в большом количестве исследований. Например, в работе [22] исследуется приспособляемость материала при качении жёсткого цилиндра по поверхности упруго-идеально-пластической изотропной среды. В основу исследования положена теорема Мелана: приспособляемость будет иметь место, если можно указать какое-либо, не зависящее от времени, распределение остаточных напряжений, которое в совокупности с напряжением отвечающими идеально упругому поведению, вызванными нагрузкой, образует систему напряжений, не выходящих за пределы текучести. Для того, чтобы применить эту теорему, рассмотрим напряженное состояние, возникающее при контакте цилиндра с поверхностью. Контактные напряжения можно определить по формуле:

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		27

$$q = p_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}, \quad (1.17)$$

где p_0 – среднее контактное давление,

$$p_0 = \frac{2P}{\pi \cdot a}, \quad (1.18)$$

где P – сила вдавливания цилиндра;

a – полуширина зоны контакта.

В результате контактной нагрузки, в полупространстве возникают поля напряжения:

$$\begin{aligned} \sigma'_X &= \sigma'_X(X, Y); \\ \sigma'_Y &= \sigma'_Y(X, Y); \\ \tau'_{XY} &= \tau'_{XY}(X, Y). \end{aligned} \quad (1.19)$$

Главные напряжения для плоского напряженного состояния имеют вид:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{1}{2}(\sigma'_X + \sigma'_Y) + \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma'_X - \sigma'_Y)^2 + 4 \cdot \tau'_{XY}{}^2}; \\ \sigma_2 &= \frac{1}{2}(\sigma'_X + \sigma'_Y) - \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma'_X - \sigma'_Y)^2 + 4 \cdot \tau'_{XY}{}^2}; \\ \sigma_3 &= \frac{1}{2}(\sigma'_X + \sigma'_Y). \end{aligned} \quad (1.20)$$

Если в материале предварительно наведены остаточные напряжения:

$$\sigma''_X = \sigma''_X(X, Y), \quad (1.21)$$

то главные напряжения, согласно принципу суперпозиции, будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{1}{2}(\sigma'_X + \sigma''_X + \sigma'_Y) + \frac{1}{2}\sqrt{((\sigma'_X + \sigma''_X) - \sigma'_Y)^2 + 4 \cdot \tau'_{XY}{}^2}; \\ \sigma_1 &= \frac{1}{2}(\sigma'_X + \sigma''_X + \sigma'_Y) - \frac{1}{2}\sqrt{((\sigma'_X + \sigma''_X) - \sigma'_Y)^2 + 4 \cdot \tau'_{XY}{}^2}. \end{aligned} \quad (1.22)$$

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		28

Если в качестве условия пластичности принять критерий Треска [22]:

$$\frac{1}{4}(\sigma_1 - \sigma_2)^2 \leq \tau_{max}^2, \quad (1.23)$$

где τ_{max} – максимальные касательные напряжения в материале, то условие приспособляемости примет вид:

$$\frac{1}{4}(\sigma'_X + \sigma''_X - \sigma'_Y)^2 + \tau'^2_{XY} \leq \tau_{max}^2. \quad (1.24)$$

Последнее выражение хорошо поясняет суть теоремы Мелана. Так как остаточные напряжения входят в выражение (1.24), то они влияют на параметры зоны пластичности. Следовательно, их можно подобрать такими, что зона пластичности будет отсутствовать. В этом заключается одна из причин возникновения приспособляемости, связанная с остаточными напряжениями. Другая причина связана с наклёпом материала, рассмотрена ниже.

В процессе пластического деформирования в материале происходят сложные изменения тонкой кристаллической структуры [20]: интенсивное дробление блоков, рост числа дислокаций, распад нестабильных структур. Эти процессы приводят к изменению механических свойств материала. На макроуровне процесс упрочнения исследуется при помощи диаграмм циклического деформирования, которые отражают зависимость между напряжениями и деформациями при многократном нагружении исследуемого материала. По типу диаграммы все материалы условно делятся на три группы (рисунок 1.10).

Изучение свойств материала при циклическом нагружении посвящены исследования [23, 24] и других авторов. Авторы показывают, что циклическая диаграмма нагружения существенно зависит от типа материала, его механических свойств, а также от вида нагружения. В наиболее общем случае, поведение материала при циклическом нагружении можно выразить в виде формулы:

$$\sigma_U^i = f(\sigma_U^{i-1}, \sigma_U^{\max}, \epsilon_U), \quad (1.25)$$

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		29

подповерхностного пика остаточных напряжений, формирование при ПДД растягивающих напряжений на поверхности, объясняется лишь качественно.

3) Экспериментально наблюдаемые зависимости эпюр остаточных напряжений микротвердости от времени упрочнения не имеют теоретического обоснования. Отсутствуют методики, учитывающие приспособляемость материала при ДУ.

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		31

2 РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

2.1 Описание процесса формирования остаточных напряжений

Дробеструйное упрочнение является сложным физическим процессом, в котором задействованы многие факторы: тепловые, ударные, упругопластические и др. В результате упрочнения в материале возникают механические и структурные изменения: образование остаточных напряжений, рост твердости, изменения в структуре материала.

Учет влияния на упрочнение всех совокупных факторов не представляется возможным ввиду сложности аппарата. Наиболее оптимальным путем представляется выделение особо важных факторов, влияющих на упрочнение и включение их в математическую модель.

Реально процесс упрочнения состоит из множества ударов, хаотичным образом распределяемых по поверхности. Каждый удар шарика о поверхность вносит локальные изменения в состояние поверхностного слоя материала. Множество таких локальных контактов приводит к появлению в материале технологических параметров упрочнения. Под технологическими параметрами упрочнения будем понимать совокупность характеристик упрочняемого материала, влияющих на долговечность.

К наиболее важным характеристикам относятся шероховатость поверхности, остаточные напряжения и твердость материала. Рассмотрев влияние однократного удара на эти характеристики и построив связь между однократным ударом и реальным процессом упрочнения, состоящим из множества однократных ударов, можно описать процесс упрочнения исходящей из его физической основы.

Модель однократного упругопластического контакта шара с полупространством рассматривается в работах [25, 26] при различных граничных условиях. В основе решения стоит модель, составленная из набора упругопластических уравнений с заданными граничными условиями в области

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		32

контакта. Заданная модель решается численными методами. Однако, получаемые расчётные характеристики не годятся для анализа режимов упрочнения, так как они рассчитаны для одного контактного взаимодействия. Реально же суммарные эпюры остаточных напряжений и твердости, сформированных от множества ударов шариками по поверхности. Поэтому ключевой задачей является установление связи между однократным ударом и многократным взаимодействием шара с полупространством. Для решения этой задачи применяется метод локальной суперпозиции, ниже излагается его суть.

В теории упругости рассматривается метод суперпозиции [27], который заключается в следующем. Предполагается, что линейно-упругое тело находится в двух состояниях нагружения. В первом случае тело испытывает действие массовых сил f_i' при граничных условиях:

$$\sigma'_{ij}n_j = t'_i \text{ на } S_t \text{ и } U'_i = U_i^{(S)'} \text{ на } S_U, \quad (2.1)$$

а во втором случае находится под действием массовых сил f_i'' при граничных условиях:

$$\sigma''_{ij}n_j = t''_i \text{ на } S_t \text{ и } U''_i = U_i^{(S)''} \text{ на } S_U. \quad (2.2)$$

Тогда на основании принципа суперпозиции, функции:

$$U_i = U'_i + U''_i, \sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \sigma''_{ij} \quad (2.3)$$

определяют решения для данного тела под действием массовых сил:

$$f_i = f'_i + f''_i \quad (2.4)$$

при граничных условиях:

$$\sigma_{ij}n_j = t'_i + t''_i \text{ на } S_t \text{ и } U_i = U_i^{(S)'} + U \text{ на } S_U. \quad (2.5)$$

Если при нагрузке в теле возникает область пластичности, то этот метод применять нельзя. Однако, если расстояние между областями пластичности достаточно велико, размеры этих областей невелики и решения сводятся к нулю при стремлении аргументов к бесконечности:

$$\lim_{r' \rightarrow \infty} \sigma'_{ij} = 0, \lim_{r' \rightarrow \infty} \sigma''_{ij} = 0, \quad (2.6)$$

то можно утверждать, что решение σ'_{ij} и σ''_{ij} незначительно влияют друг на друга и принцип суперпозиции выполняется.

Анализируя вышесказанное, окончательно метод локальной суперпозиции можно сформулировать следующим образом: принцип суперпозиции справедлив для упругопластических нагружений, если размеры областей пластичности невелики по сравнению с расстояниями между ними, и частные решения сходятся к нулю на бесконечности. Применяя данный принцип к дробеструйной обработке, можно утверждать, что для локальных интервалов времени принцип локальной суперпозиции выполняется. Это легко доказать, если предположить, что расход шариков в единицу времени постоянен, тогда количество шариков, ударившихся о поверхность прямо пропорционально времени упрочнения.

$$\Delta n = Q \cdot \Delta t. \quad (2.7)$$

Из выражения (2.7) видно, что Δt можно выбрать таким, что Δn – число ударов, будет мало и тогда следует справедливость вышесказанного.

Применим принцип локальной суперпозиции для расчёта остаточных напряжений. Если произошло Δn ударов шариков о поверхность, то для суммарной эпюры остаточных напряжений можно записать:

$$\Delta \sigma_i^{\Sigma \text{ост}}(X, Y, Z) = \sigma_i^{\text{ост}}(X, Y, Z) + \sigma_i^{\text{ост}}(X + \Delta l, Y, Z) + \dots + \sigma_i^{\text{ост}}(X + \Delta l \Delta n, Y, Z), \quad (2.8)$$

где Δl – расстояние между осями симметрии отпечатков;

$\sigma_i^{\text{ост}}(X, Y, Z)$ – система остаточных напряжений, которая образовалась в результате однократного упругопластического контакта шара с полупространством.

В цилиндрической системе координат она имеет вид:

$$\sigma_r^{\text{ост}} = \sigma^{\text{ост}}(r, Z);$$

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		34

$$\sigma_{\theta}^{\text{ост}} = \sigma_{\theta}^{\text{ост}}(r, Z); \quad (2.9)$$

$$\sigma_z^{\text{ост}} = \sigma_z^{\text{ост}}(r, Z).$$

Остаточные напряжения, рассчитанные по формуле (2.8), будут иметь сложный волнообразный характер (рисунок 2.1). Однако, чем больше ударов произошло по поверхности, тем меньше колебаний суммарных остаточных напряжений вокруг некоторого среднего значения. Поэтому имеет смысл ввести понятие средних остаточных напряжений. Их ввод также обусловлен тем, что на практике именно они являются критериями эффективности процесса упрочнения.

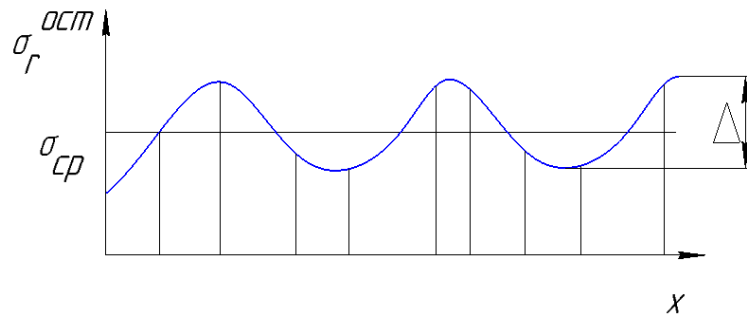


Рисунок 2.1 – Распределение остаточных напряжений

Средние остаточные напряжения по поверхности от одного удара можно найти из уравнения:

$$\begin{aligned} \overline{\sigma_r^{\text{ост}}} &= \frac{2\pi}{S_o} \int_0^R r \cdot \sigma_r^{\text{ост}}(r, Z) dr; \\ \overline{\sigma_{\theta}^{\text{ост}}} &= \frac{2\pi}{S_o} \int_0^R r \cdot \sigma_{\theta}^{\text{ост}}(r, Z) dr; \\ \overline{\sigma_z^{\text{ост}}} &= \frac{2\pi}{S_o} \int_0^R r \cdot \sigma_z^{\text{ост}}(r, Z) dr, \end{aligned} \quad (2.10)$$

где S_o – площадь, на которой определяются средние напряжения.

Для нахождения средних суммарных остаточных напряжений необходимо перейти от полярной к декартовой системе координат:

$$\overline{\sigma_X^{\text{ост}}} = \frac{\pi}{4} (\overline{\sigma_r^{\text{ост}}} + \overline{\sigma_\theta^{\text{ост}}});$$

$$\overline{\sigma_Y^{\text{ост}}} = 4(\overline{\sigma_r^{\text{ост}}} + \overline{\sigma_\theta^{\text{ост}}}).$$
(2.11)

Из (2.11) видно, что $\overline{\sigma_X^{\text{ост}}} = \overline{\sigma_Y^{\text{ост}}}$, что вытекает из осевой симметричности упругопластической задачи. Подставляя выражение (2.11) в (2.8) получаем формулу для определения средних суммарных остаточных напряжений.

$$\overline{\Delta\sigma_i^{\Sigma\text{ост}}}(Z, \Delta n) = \overline{\sigma_i^{\text{ост}}}(Z) + \overline{\sigma_i^{\text{ост}}}(Z, \Delta l) + \dots + \overline{\sigma_i^{\text{ост}}}(Z, \Delta l \cdot \Delta n).$$
(2.12)

Так как средние напряжения, рассчитанные по формуле (2.12), не зависят от координат X и Y, то его можно упростить.

$$\overline{\Delta\sigma_i^{\Sigma\text{ост}}}(Z, \Delta n) = \overline{\sigma_i^{\text{ост}}}(Z) \cdot \Delta n.$$
(2.13)

Формула 2.13 дает возможность рассчитать эпюру остаточных напряжений пользуясь решениями, полученными для одного удара. Однако это выражение будет справедливо лишь для небольшого количества ударов Δn . Это происходит из-за того, что величина $\sigma_i^{\text{ост}}$ не является постоянной величиной. В процессе упрочнения, вследствие наклёпа материала и появления остаточных напряжений, начинают работать механизмы приспособляемости, которые приводят к уменьшению зоны пластичности в момент удара шарика о поверхность и, следовательно, к изменению остаточных напряжений от однократного отпечатка. Поэтому в самом общем случае остаточные напряжения от однократного отпечатка зависят как от предела текучести, так и от предварительно остаточных напряжений:

$$\sigma_X^{\text{ост}} = \sigma_X^{\text{ост}}(X, Y, Z, \sigma_T^{\Sigma}, \sigma_X^{\Sigma\text{ост}}),$$
(2.14)

где σ_T^{Σ} – предел текучести материала;

$\sigma_X^{\Sigma\text{ост}}$ – остаточные напряжения в материале.

Для средних остаточных напряжений можно аналогично предыдущему записать:

$$\overline{\sigma_X^{\text{ост}}} = \overline{\sigma_X^{\text{ост}}}(Z, \overline{\sigma_T^\Sigma}, \overline{\sigma_X^{\Sigma \text{ост}}}), \quad (2.15)$$

где $\overline{\sigma_T^\Sigma}$ и $\overline{\sigma_X^{\Sigma \text{ост}}}$ – средний предел текучести и предварительные средние остаточные напряжения. Так как $\overline{\sigma_X^{\text{ост}}} = \overline{\sigma_Y^{\text{ост}}}$, то будем записывать зависимость только для $\overline{\sigma_X^{\text{ост}}}$, однако они будут немедленно распространяться и для $\overline{\sigma_Y^{\text{ост}}}$.

Как видно из уравнений (2.14) и (2.15) рост остаточных напряжений существенно зависит от $\overline{\sigma_T^\Sigma}$ и $\overline{\sigma_X^{\Sigma \text{ост}}}$, поэтому, установив для них дифференциальные зависимости, решим задачу определения остаточных напряжений.

Пусть в результате однократного удара произошло локальное упрочнение поверхности, которое можно выразить в виде приращения предела текучести:

$$\overline{\Delta\sigma_T}(Z) = \overline{\sigma_T^\Sigma}(Z, n) - \overline{\sigma_T^\Sigma}(Z, n - 1). \quad (2.16)$$

Для того, чтобы рассчитать приращение предела текучести, необходимо рассмотреть механизмы приспособляемости материала, которые описываются при помощи циклической диаграммы деформирования материала. Такая диаграмма полностью описывает свойства материала. Для того, чтобы воспользоваться ей для расчетов, вводится понятие коэффициент упрочнения материала, который определяется по формуле:

$$\alpha^{(n)} = \frac{f^{(n)} \cdot (\sigma_u^{\text{max}}, \sigma_T^{(n-1)}, \varepsilon_T^{(n)})}{\sigma_u^{\text{max}}}, \quad (2.16)$$

где $f^{(n)}$ – диаграмма деформирования на n – ом цикле.

Если учесть, что:

$$\sigma_T^{(n)} = f^{(n)}(\sigma_u^{\text{max}}, \sigma_T^{(n-1)}, \varepsilon_T^{(n)}), \quad (2.17)$$

то выражение (2.16) примет вид:

$$\alpha^{(n)} = \frac{\sigma_T^{(n)}}{\sigma_u^{\text{max}}}. \quad (2.18)$$

									Лист
									37
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

наклёпанного материала. Поэтому можно вести речь о среднем приращении предела текучести $\Delta\bar{\sigma}_T$.

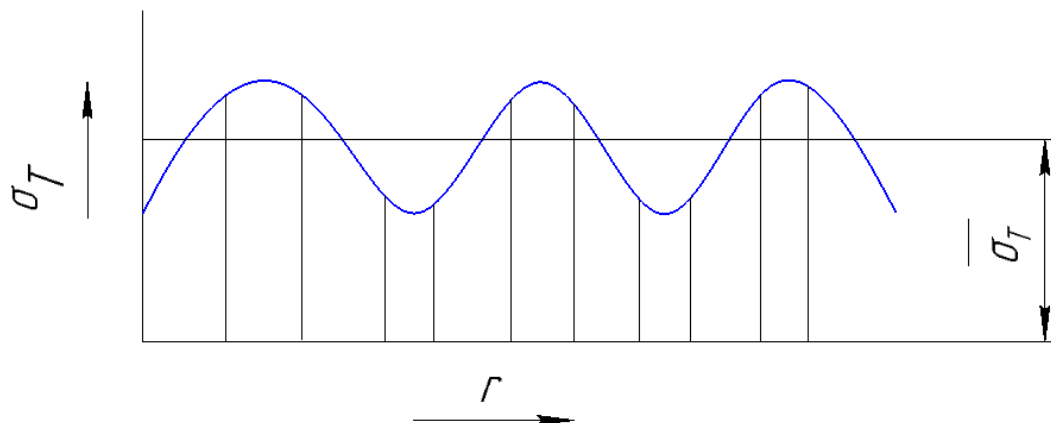


Рисунок 2.2 – Распределение предела текучести в наклёпанном материале

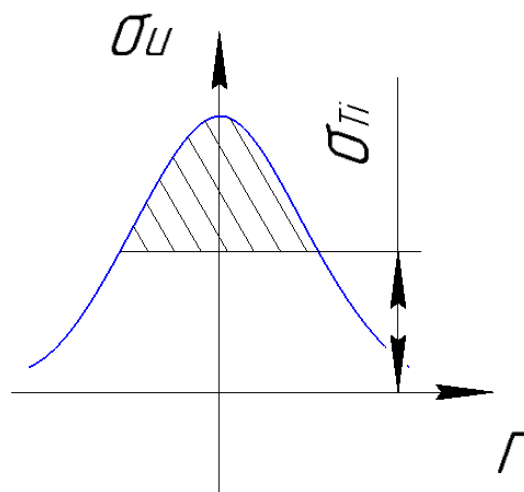


Рисунок 2.3 – Приращение предела текучести от одного удара

На основании выражения (2.22) находится среднее приращение предела текучести $\bar{\sigma}_T$ от одного удара. Из рисунка 2.3 следует, что:

$$\Delta\bar{\sigma}_T(Z) = \frac{1}{S} \int_0^{S_M} (\alpha \sigma_u(X, Y, Z) - \bar{\sigma}_T^\Sigma(Z)) dS, \quad (2.23)$$

где S – площадь зоны пластического деформирования:

$$S = \pi l^2, \quad (2.24)$$

где l – радиус зоны пластического деформирования, его можно определить из уравнения:

$$\sigma_u(l, Z) = \overline{\sigma_T}(Z). \quad (2.25)$$

Так как среднее приращение предела текучести не зависит от координат X и Y , то среднее суммарное приращение предела текучести от нескольких ударов можно найти из выражения:

$$\overline{\Delta\sigma_T^\Sigma}(Z, \Delta n) = \Delta\overline{\sigma_T}(Z)\Delta n. \quad (2.26)$$

Произведя интегрирование в (2.23), получим:

$$\overline{\Delta\sigma_T^\Sigma}(Z) = \frac{2\pi}{S} F(Z, l, \alpha, \sigma_u) - \frac{\pi l^2}{S} \overline{\sigma_T^\Sigma}(Z), \quad (2.27)$$

где $F(Z, l, \alpha, \sigma_u) = \int_0^l r \alpha \sigma_u dr$.

Если подставить выражение (2.27) в (2.26), получим зависимость среднего приращения предела текучести от коэффициента упрочнения:

$$\overline{\Delta\sigma_T^\Sigma}(Z, \Delta n) = \frac{2\pi}{S} \left[F(Z, l, \alpha, \sigma_u) - \frac{l^2}{2} \overline{\sigma_T^\Sigma}(Z) \right] \Delta n. \quad (2.28)$$

Если по поверхности производится большое количество ударов и изменение состояния тела за Δn ударов крайне незначительно, то имеет смысл перейти к непрерывным величинам. Пусть Δn такое количество ударов, что выполняется условие

$$\left| \overline{\sigma_T^\Sigma}(Z, n + \Delta n) - \overline{\sigma_T^\Sigma}(Z, n) \right| \leq \varepsilon, \quad (2.29)$$

где ε – достаточно маленькое число.

Переходя к пределу:

$$\Delta N \rightarrow dN,$$

$$\Delta\sigma_T \rightarrow d\sigma_T,$$

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		40

получим дифференциальное уравнение:

$$\frac{d\overline{\sigma_T^\Sigma}(Z, n)}{dn} = \frac{2 \cdot \pi}{S} \cdot \left[F(Z, l, \alpha, \sigma_u) - \frac{l^2}{2} \cdot \overline{\sigma_T^\Sigma}(Z) \right]. \quad (2.30)$$

Если предположить, что шарики равномерно с течением времени ударяются о поверхность, то получим:

$$N = Q \cdot T, \quad (2.31)$$

где Q – расход шариков в секунду.

Подставляя (2.31) в (2.305) и произведя преобразования, получим:

$$\frac{d\overline{\sigma_T^\Sigma}(Z, t)}{dt} = 2\pi q \left[F(Z, l, \alpha, \sigma_u) - \frac{l^2}{2} \overline{\sigma_T^\Sigma}(Z) \right], \quad (2.32)$$

где q – расход шариков в единицу поверхности.

Для нахождения средних суммарных остаточных напряжений применяется принцип локальной суперпозиции. А именно, предполагается, что остаточные напряжения от множества ударов за ограниченный промежуток времени определяются на основании выражения (2.13):

$$\Delta\overline{\sigma_X^{\Sigma \text{ост}}}(Z, \Delta n) = \overline{\sigma_X^{\text{ост}}}(Z, \overline{\sigma_T^\Sigma}, \overline{\sigma_X^{\Sigma \text{ост}}}) \Delta n. \quad (2.33)$$

Далее предлагается, что существует такое число Δn , что выполняется условие:

$$\left| \Delta\overline{\sigma_X^{\Sigma \text{ост}}}(Z, n + \Delta n) - \overline{\sigma_X^{\Sigma \text{ост}}}(Z, n) \right| \leq \varepsilon, \quad (2.34)$$

где ε – достаточно маленькое число.

Переходя к пределам, получается дифференциальное уравнение:

$$\frac{d\overline{\sigma_X^{\Sigma \text{ост}}}}{dn} = \overline{\sigma_X^{\text{ост}}}(Z, \overline{\sigma_T^\Sigma}, \overline{\sigma_X^{\Sigma \text{ост}}}). \quad (2.35)$$

Уравнение (2.35) описывает поведение суммарных остаточных напряжений в зависимости от числа ударов n , однако удобнее связать напряжения не с n , а с временем упрочнения t , которые можно непосредственно измерять при упрочнении. Используя (2.31), получим:

$$\frac{d\overline{\sigma_X^{\Sigma \text{ост}}}}{dt} = \frac{Q}{S} \overline{\sigma_X^{\text{ост}}}(Z, \overline{\sigma_T^{\Sigma}}, \overline{\sigma_X^{\Sigma \text{ост}}}), \quad (2.36)$$

Сравнивая (2.36) с (2.10) и (2.11), получим:

$$\overline{\sigma_X^{\text{ост}}} = \frac{\pi}{4S} (F_r + F_\theta); \quad (2.37)$$

$$\overline{\sigma_Y^{\text{ост}}} = \frac{\pi}{4S} (F_r + F_\theta),$$

где

$$F_r = 2\pi \int_0^R r \sigma_r^{\text{ост}}(r, Z) dr; \quad (2.38)$$

$$F_\theta = 2\pi \int_0^R r \sigma_\theta^{\text{ост}}(r, Z) dr.$$

С учётом (2.37) уравнение (2.36) примет вид:

$$\frac{d\overline{\sigma_X^{\Sigma \text{ост}}}}{dt} = \frac{\pi q}{4} (F_r + F_\theta), \quad (2.39)$$

где F_r и F_θ неявно зависят от t .

Для уравнения (2.39) и (2.32) следует установить граничные условия. Если предположить, что перед упрочнением материал является изотропным с определённым пределом текучести σ_T , и в нём отсутствуют начальные напряжения, то получим:

$$\overline{\sigma_T^\Sigma}(Z, t) \Big|^{t=0} = \sigma_T; \quad (2.40)$$

$$\overline{\sigma_X^{\Sigma \text{OCT}}}(Z, t) \Big|^{t=0} = 0$$

В итоге полученную система дифференциальных уравнений будет иметь вид:

$$\frac{d\overline{\sigma_T^\Sigma}(z, t)}{dt} = 2\pi q \left[F(Z, l, \alpha, \sigma_u) - \frac{l^2}{2} \overline{\sigma_T^\Sigma}(Z, t) \right]; \quad (2.41)$$

$$\frac{d\overline{\sigma_X^{\Sigma \text{OCT}}}}{dt} = \frac{q}{2} (F_r + F_\theta),$$

где

$$F(Z, l, \alpha, \sigma_u) = \int_0^R r \alpha \sigma_u(r, Z) dr;$$

$$F_r = 2\pi \int_0^R r \sigma_r^{\text{OCT}}(r, Z) dr; \quad (2.42)$$

$$F_\theta = 2\pi \int_0^R r \sigma_\theta^{\text{OCT}}(r, Z) dr,$$

а l находится из уравнения:

$$\sigma_u(l, Z) = \sigma_T(Z, t). \quad (2.43)$$

Граничные условия для данной системы следующие:

$$\overline{\sigma_T^\Sigma}(Z, t) \Big|^{t=0} = \sigma_T; \quad (2.44)$$

$$\overline{\sigma_X^{\Sigma \text{OCT}}}(Z, t) \Big|^{t=0} = 0.$$

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		43

Остаточные напряжения можно найти, пользуясь теоремой о разгрузке:

$$\begin{aligned}\overline{\sigma_r^\Sigma}(r, Z) &= \sigma_r(r, Z, \sigma_T) - \sigma_r^{\text{упп}}(r, Z); \\ \overline{\sigma_\theta^\Sigma}(r, Z) &= \sigma_\theta(r, Z, \sigma_T) - \sigma_\theta^{\text{упп}}(r, Z).\end{aligned}\tag{2.45}$$

Нагрузочные напряжения G_r и G_θ можно найти, основываясь на решении задачи однократного удара.

2.2 Модель однократного удара

Как показано в пункте 2.1, отправной точкой для построения модели дробеструйного упрочнения, является решение задачи однократного воздействия шарика на полупространство. Ниже кратко излагаются основные этапы решения. Исходными данными для моделей являются:

V – скорость полета шариков;

R – радиус шариков;

ρ – плотность материала шариков;

E – модуль упругости;

μ – коэффициент Пуассона;

$\sigma_u = G_u(\epsilon_u)$ – кривая упрочнения материала.

Шарик летящий со скоростью V ударяется о поверхность, в зоне контакта развиваются контактные усилия, и кинетическая энергия шара начинает преобразовываться в упругую энергию полупространства и шарика, при этом часть энергии идёт на пластическую деформацию материала. После того как скорость шарика станет равной нулю, должно выполняться условие

$$\frac{mV^2}{2} = k(A_p + A_{ш}),\tag{2.46}$$

где A_p – энергия полупространство;

$A_{ш}$ – упругая энергия шарика;

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44

k – поправочный коэффициент, учитывающий влияние шероховатости гидродинамической плёнки, образующейся в момент удара.

Уравнение (2.46) является исходным для формирования граничных условий контактной задачи с неоднородным полупространством.

Для того, чтобы вычислить работу Ап, необходимо найти распределение напряжений в полупространстве. Для этого необходимо решить систему дифференциальных уравнений, описывающих упругопластическое поведение материала. Учитывая осевую симметрию, поставленную систему уравнений удобнее всего записать в цилиндрической системе координат (r, θ, Z) , где r – радиус, Z – ось, направленная вдоль оси симметрии, θ – полярный угол.

Считается, что массовые силы отсутствуют, поэтому уравнения равновесия имеют вид:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{d\tau_{rz}}{dZ} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0;$$

$$\frac{d\sigma_z}{dZ} + \frac{d\tau_{zr}}{dr} + \frac{\tau_{zr}}{r} = 0.$$
(2.47)

В дальнейшем будем использовать обозначения:

σ_r, σ_z – радиальные и осевые напряжения;

ϵ_r, ϵ_z – радиальные и осевые деформации;

u, ω – радиальные и осевые перемещения;

$\tau_{zr} = \tau$ – касательные напряжения;

$\gamma_{zr} = \gamma$ – деформации сдвига;

θ – объемная деформация.

Для удобства решения уравнения (2.47) преобразуем его к виду:

$$\frac{d(\sigma_r r)}{dr} + \frac{d(r\tau_{rz})}{dZ} + \sigma_\theta = 0;$$

$$\frac{d(\sigma_z r)}{dZ} + \frac{d(\tau_{zr} r)}{dr} = 0.$$
(2.48)

Это сделано для того, чтобы легче было аппроксимировать решаемую систему на оси Z . Действительно, систему (2.47) корректно можно решать лишь при условии, что:

$$\lim_{r \rightarrow 0} r\sigma_r = 0, \quad \lim_{r \rightarrow 0} r\sigma_z = 0. \quad (2.49)$$

Эти предельные соотношения и закладываются при реализации конечно-разностных формул. Закон Гука Запишем в цилиндрической системе координат:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \lambda\theta + 2\sigma\varepsilon_r; \quad \sigma_\theta = \lambda\theta + 2\sigma\varepsilon_\theta; \\ \sigma_z &= \lambda\theta + 2\sigma\varepsilon_z; \quad \tau = \sigma\gamma. \end{aligned} \quad (2.50)$$

Учитывая, что:

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dZ}, \quad \varepsilon_z = \frac{d\omega}{dZ}, \quad \gamma = \frac{du}{dZ} + \frac{d\omega}{dZ}, \quad (2.51)$$

можно записать закон Гука в перемещениях:

$$\sigma_r = \lambda\theta + 2\sigma \frac{du}{dZ}; \quad \sigma_z = \lambda\theta + 2\sigma \frac{d\omega}{dZ}; \quad \tau = \sigma \left(\frac{du}{dZ} + \frac{d\omega}{dZ} \right). \quad (2.52)$$

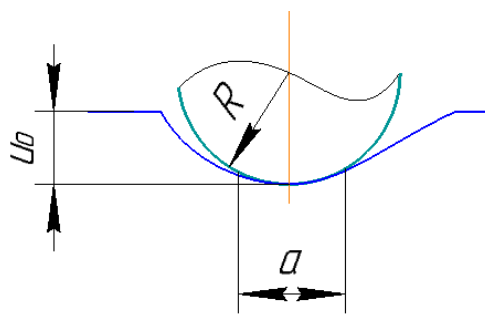


Рисунок 2.4 – Схема зоны контакта

Для решения задачи выделим конечный объем полупространства в виде цилиндра радиуса R и высоты H . На верхнем основании цилиндра граничные условия зададим в перемещениях (рисунок 2.4):

а) в зоне контакта $u = u_0$, $\omega = \omega_0$, где (u_0, ω_0) внедрение индентора в полупространство на заданных расстояниях от оси Z ;

b) вне зоны контакта свободная, то есть, в соответствующих узлах решается система (2.48).

Кроме того, в связи с отсутствием трения, касательные напряжения на поверхности равна нулю $\tau = 0$. На боковой грани цилиндра $r = R$ и на нижнем основании $Z = H$ граничные условия заданы в напряжениях, которые рассчитываются по формулам теории упругости, а именно на боковой поверхности:

$$\sigma_r = \sigma_r^{\text{упр}}(R, Z); \tau = \tau^{\text{упр}}(R, Z), \quad (2.53)$$

на дне: $\tau_r = \tau_r(r, H); \sigma_z = \sigma_z^{\text{упр}}(r, H),$

где $\sigma_r^{\text{упр}}, \sigma_z^{\text{упр}}, \tau^{\text{упр}}$ рассчитывают по формулам решения задачи о вдавливании сферического индентора в упругое полупространство [28]. При этом размеры цилиндра должны выбираться так, чтобы область пластической деформации находилось внутри цилиндра. На оси симметрии $r = 0$ в качестве граничных примем следующие условия: $u_r = 0$, так как на оси симметрии радиальное перемещение равно нулю; $\tau_{zr} = 0$ аналогично, в силу симметрии.

Для описания процессов пластичности воспользуемся уравнениями теории малых упругопластических деформаций и метода упругих решений, которые после некоторых преобразований могут быть записаны в форме закона Гука:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E^*} [\sigma_r - V^*(\sigma_\theta + \sigma_r)]; \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E^*} [\sigma_\theta - V^*(\sigma_r + \sigma_z)]; \\ \varepsilon_\theta &= 0, \quad \gamma = \frac{1}{\sigma^*} \tau, \end{aligned} \quad (2.53)$$

где

$$E^* = \frac{\frac{\sigma_u}{\epsilon_u}}{1 + \frac{3 - 2V}{3E} \cdot \frac{\sigma_u}{\epsilon_u}}; \quad \sigma^* = \frac{\sigma_u}{3\epsilon_u}; \quad (2.54)$$

$$V^* = \left(\frac{1}{2} - \frac{1 - 2V}{3E} \cdot \frac{\sigma_u}{\epsilon_u} \right) / \left(1 + \frac{1 - 2V}{3E} \cdot \frac{\sigma_u}{\epsilon_u} \right),$$

где σ_u – интенсивность напряжений;

ϵ_u – интенсивность деформаций.

Тогда решение задачи теории пластичности сводится к решению задачи контактной теории упругости с переменными параметрами упругости [4, 29], определяемыми по формуле (2.54), причём зависимость между параметрами упругости:

$$\sigma^* = E^*/2(1 + V^*). \quad (2.55)$$

Решение контактных задач и организуется следующим образом:

1) задается начальное внедрение шарика в полупространство и с заданными граничными условиями методом переменных параметров упругости определяются напряжения и деформации в материале;

2) далее определяется энергия деформированного полупространства по формулам:

$$A = \int_0^H 2\pi \int_0^R rWdrdz, \quad (2.56)$$

где W – плотность энергии.

$$W = W_0 + W_\phi, \quad (2.57)$$

где W_0 – энергия объемной деформации;

W_ϕ – энергия формообразования;

$$W_0 = \frac{1 - 2V^*}{3E^*} (\sigma_r + \sigma_z + \sigma_\theta)^2; \quad (2.58)$$

$$W_\Phi = \int_0^\varepsilon \sigma_u \varepsilon_u d\varepsilon_u.$$

3) проверяем выполнение условий (2.46), учитывая предположение, что шарик идеально жёсткий и $A_{ш} = 0$. Если условие не выполняется, то продолжаем внедрять шарик в полупространство, затем переходим к пункту (б). Если условие выполняется, то расчет оканчивается.

Метод переменных параметров упругости состоит в следующем. В первом приближении решают обычную задачу теории упругости, когда переменные параметры упругости равны постоянным $E^* = E$, $V^* = V$ так как система (2.13) обращается в обычный закон Гука. На первом этапе воспользуемся аналитическими формулами, полученными в работе [28]. По полученным перемещением находим деформации $\varepsilon_z^{(1)}, \varepsilon_r^{(1)}, \varepsilon_\theta^{(1)}$ и напряжения $\sigma_z^{(1)}, \sigma_r^{(1)}, \sigma_\theta^{(1)}$. По последним величинам, в каждой точке определяем интенсивности напряжений $\sigma_u^{(1)}$ и деформаций $\varepsilon_u^{(1)}$. По кривой деформирования находим интенсивность напряжений $\sigma_u^{(1)*}$, которая соответствует вычисленному значению $\varepsilon_u^{(1)}$, затем полагаем $\sigma_1^* = \sigma_u^{(1)*} / 3\varepsilon_u^{(1)}$, и находим модули E_1^* и V_1^* , согласно (2.54).

На втором шаге решаем задачу теории упругости с полученными параметрами упругости, определяем во втором приближении перемещение $u^{(2)}$ и $\omega^{(2)}$, затем $\varepsilon_z^{(2)}, \varepsilon_r^{(2)}, \varepsilon_\theta^{(2)}$ и $\sigma_z^{(2)}, \sigma_r^{(2)}, \sigma_\theta^{(2)}$, по ним находим интенсивности $\sigma_u^{(2)}, \varepsilon_u^{(2)}$ в каждой точке пространства, вычисляем $\sigma_u^{(2)*}$ по кривой деформирования, полагаем $\sigma_2^* = \sigma_u^{(2)*} / 3\varepsilon_u^{(2)}$ и т.д.

Расчёты продолжаются до тех пор, пока полученные результаты расчетов приближения не будут отличаться от результатов $(n - 1)$ приближения на заданную величину с требуемой точностью. В качестве основного критерия в программе было выбрано условие, $|\sigma_n^* - \sigma_{n-1}^*| < \varepsilon$, что означает фактически

неизменность параметров упругости. В работе [30] утверждается, что при конкретных исходных параметрах, данный процесс сходится.

2.3 Допущения модели однократного удара

В связи с выбором уравнений (2.47 – 2.58) для решения контактной задачи, приходится вводить ряд допущений для упрощения поставленной задачи. Эти допущения связаны с влиянием динамических факторов и шероховатости.

2.3.1 Влияние динамических факторов

Как было показано в пункте 2.1, удар шарика о поверхность является сложным процессом, для описания которого необходимо использовать уравнения термоупругости, пластичности, теории удара, гидродинамики. Кроме того, наличие сложного профиля поверхности, который образуется из-за шероховатости, делает данную задачу трудно разрешимой.

Вместе с тем, как показал анализ, можно выделить определяющие уравнения, от которых зависит поведение модели, а остальные несущественные связи отбросить. Так как скорость полёта шарика в при гидродробеструйной обработке невелика (4 – 10 м/с), то можно пренебречь динамическими эффектами, и принять, что удар является квазистатический. Под квазистатический понимается следующие:

а) деформации считаются сосредоточенными в окрестностях области контакты и определяются статической теории, волновым движением в телах пренебрегается;

б) каждое тело в любой момент движется со скоростью его центра масс. Условия квазистатичности остаётся справедливым и в случае пластических деформаций, так как наличие пластического течения уменьшает интенсивность контактного давление и, следовательно, энергию, идущую на упругое волновое движение. При скорости удара до 50 м/с можно использовать соотношения для неупругих контактных напряжений при статических условиях [22], однако при этом предел текучести заменяется на динамический предел текучести. По этой

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		50

причине пренебрегаем влиянием термических напряжений, так как даже если предположить, что на нагрев расходуется вся энергия шарика, её всё равно не хватит, чтобы оказать существенное влияние на распределение остаточных напряжений.

Процесс сопровождается непрерывным поливом масла, из-за чего на упрочняемой поверхности и шарике образуется масляная плёнка. В связи с вышесказанным, будем исходить из следующих предположений:

а) наличие масляной пленки не влияет на распределение контактных напряжений и деформаций в момент удара;

б) в момент удара часть энергии расходуется на преодоление масляной плёнки, из-за наличия вязкости масла, поэтому будем предполагать, что эта энергия является постоянной и не зависит ни от каких параметров.

2.3.2 Влияние шероховатости

Наличие шероховатости поверхности может значительно влиять на результаты контакта шарика с контртелом. Это связано с тем, что в начале контакта происходит смятия поверхностных гребешков, на что расходуется часть энергии шарика. За счет шероховатости образуются прерывистый контакт, из-за чего происходит неравномерное распределение давления в области контакта, что может внести искажения в картину распределения контактных напряжений. Однако, если шероховатость поверхности мала, например, для шлифованных деталей, то влияние искажений, вносимых за счёт шероховатости будет несущественно для расчёта.

Для доказательства вышесказанного рассмотрим более подробно картинку распределение напряжений при внедрении шарика контртело.

На рисунке 2.5 виден дискретный характер распределения контактных давлений, кроме того, во впадинах между гребешками шероховатости возникают концентраторы напряжений, которые перераспределяет контактные напряжение у поверхности.

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		51

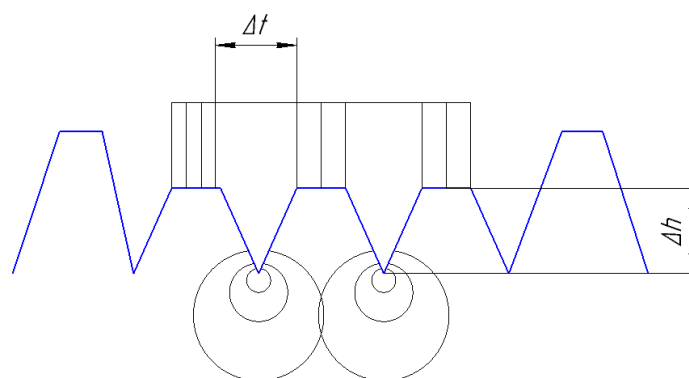


Рисунок 2.5 – Схема учета влияния шероховатости

Если предположить, что расстояние между гребешками и их высота малы по сравнению с контактной областью, то можно применить принцип Сен-Венана. В нём утверждается, что искажения, вносимые локальной неоднородностью, будут иметь тот же порядок, что и размеры самой неоднородности. Для нашего случая, глубина искажения будет определяется высотой смятых гребешков Δh и расстоянием между гребешками Δt . С учётом выполнения неравенства:

$\Delta t < R_a$, $\Delta h < R_a$, можно сказать, что искажения не будут распространяться на глубину более высоты шероховатости. Следовательно, если $R_a < 5$ мкм, то данными искажениями можно пренебречь.

На практике будем считать, что поверхность является идеально гладкой, а затраты энергии, расходуемой на деформирования гребешков, будут учитываться в формуле 2.47) вводом соответствующих поправок в коэффициент k .

2.4 Анализ уравнений приспособляемости

Система дифференциальных уравнений (2.41), выведенная в пункте 2.1, подается только численному решению. Однако, если принять некоторые допущения, то можно провести качественный анализ этих уравнений, не привлекая численных методов решения. Для этого нужно установить зависимости для однократного удара. Из экспериментов и численных расчетов известно, что интенсивность напряжений максимальна на оси симметрии отпечатка и постепенно снижается, стремясь к нулю с увеличением расстояния от оси

симметрии отпечатка. С учётом этого, для интенсивности напряжений можно записать выражение:

$$\sigma_u = \beta(Z) \cdot e^{-\varepsilon r^2}. \quad (2.59)$$

Применяя аналогичные рассуждения для остаточных напряжений и учитывая, что они существенно зависят от предела текучести материала, получим выражение:

$$\begin{aligned} \sigma_r^{\text{ост}} &= \theta_r(Z)(1 - \mu_r r^2) / k_r \sigma_T; \\ \sigma_\theta^{\text{ост}} &= \theta_\theta(Z)(1 - \mu_\theta r^2) / k_\theta \sigma_T, \end{aligned} \quad (2.60)$$

где σ_T – предел текучести;

k_r и k_θ – коэффициенты чувствительности величины остаточных напряжений к пределу текучести материала.

Функции $\beta(Z)$, $\theta_r(Z)$, $\theta_\theta(Z)$ являются, произвольными, но исходя из физического смысла необходимо потребовать:

$$\begin{aligned} \lim_{r \rightarrow \infty} \beta(Z) &= 0; \\ \lim_{r \rightarrow \infty} \theta_r(Z) &= 0; \\ \lim_{r \rightarrow \infty} \theta_\theta(Z) &= 0. \end{aligned} \quad (2.61)$$

На рисунке 2.6 схематично показано распределение интенсивности нагрузочных и остаточных напряжений в области отпечатков, которые вычисляются по формулам (2.59) и (2.60). Эти формулы отражают качественную картину распределение остаточных напряжений.



Рисунок 2.6 – Распределение напряжений в области отпечатка

Разложим функцию (2.59) в ряд Тейлора.

$$\sigma_u = \beta(Z) \left[1 + \sum (-1)^n \frac{1}{n!} \varepsilon^n r^{2n} \right]. \quad (2.62)$$

Если предел текучести подчиняется условию

$$\sigma_T \leq \sigma_u^{max}, \quad (2.63)$$

то можно отбросить в (2.62) все члены кроме первого с небольшой погрешностью, в результате получим:

$$\sigma_u = \beta(Z)[1 - \varepsilon r^2]. \quad (2.64)$$

Из (2.41) в этом (2.64) найдём текущий радиус области упрочнения:

$$\bar{\sigma}_T = \beta(Z)[1 - \varepsilon l^2], \quad (2.65)$$

Откуда

$$l^2 = \frac{1}{\varepsilon} \left(1 - \frac{\bar{\sigma}_T}{\beta(Z)} \right). \quad (2.66)$$

Теперь с учётом (2.64) проведем интегрирование уравнениями (2.42):

$$F(Z, l) = \int_0^l \alpha \beta(Z) r (1 - \varepsilon r^2) dr = \alpha \beta(Z) l^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{\varepsilon l^2}{4} \right), \quad (2.67)$$

Или с учётом (2.65):

$$F(Z, l) = \alpha \beta(Z) \frac{1}{4\varepsilon} \left(1 - \frac{\bar{\sigma}_T}{\beta(Z)} \right) \left(1 + \frac{\bar{\sigma}_T}{\beta(Z)} \right). \quad (2.68)$$

Далее возьмём интегралы для F_r и F_θ

$$F_r = 2\pi \int_0^R r \theta_r(Z) (1 - \mu_r r^2) / k_r \bar{\sigma}_T(Z) dr. \quad (2.69)$$

Очевидно, чтобы взять этот интеграл, необходимо оговорить пределы интегрирования. Радиус интегрирования R найдём из выражения:

$$\theta_r(Z)(1 - \mu_r r^2)/k_r \bar{\sigma}_T = 0, \quad (2.70)$$

отсюда следует:

$$R = \sqrt{\frac{1}{\mu_r}}. \quad (2.71)$$

Интегрируя (3.69) с учётом (3.71) получим:

$$F_r(Z, l) = \frac{\theta_r(Z)}{4\mu_r k_r \bar{\sigma}_T(Z)}. \quad (2.72)$$

Очевидно, проведя аналогичные действия для F_θ получим:

$$F_\theta(Z, l) = \frac{\theta_\theta(Z)}{4\mu_\theta k_\theta \bar{\sigma}_T(Z)}. \quad (2.73)$$

Подставим теперь полученные выражения (2.68), (2.72), (2.73) в уравнение (2.41).

После подстановки имеем:

$$\frac{d\bar{\sigma}_T^\Sigma(z, t)}{dt} = 2\pi q \left[\alpha\beta(Z) \frac{1}{4\epsilon} \left(1 - \frac{\bar{\sigma}_T^2}{\beta^2(Z)} - \frac{1}{2\epsilon} \left(1 - \frac{\bar{\sigma}_T}{\beta(Z)} \right) \right) \right]; \quad (2.74)$$

$$\frac{d\bar{\sigma}_X^{\Sigma \text{ост}}}{dt} = \frac{2q}{\pi} \left(\frac{\theta_r(Z)}{4\mu_r k_r \bar{\sigma}_T} + \frac{\theta_\theta(Z)}{4\mu_\theta k_\theta \bar{\sigma}_T} \right).$$

Рассмотрим теперь более подробно первое дифференциальное уравнение, так как оно не зависит от $\bar{\sigma}_{(Z,t)}^{\Sigma \text{ост}}$, то его можно решать отдельно. Для удобства решения введем следующие коэффициенты:

$$k = 2\pi q; \quad a = \frac{k(r - \alpha)}{4\epsilon\beta(Z)}; \quad b = \frac{k}{2\epsilon}; \quad c = \frac{\alpha k\beta(Z)}{4\epsilon}. \quad (2.75)$$

Тогда первое уравнение (2.75) преобразуется к виду:

$$\frac{d\bar{\sigma}_T(z, t)}{dt} = a\bar{\sigma}_T^2(z, t) - b\bar{\sigma}_T(z, t) + c. \quad (2.76)$$

Будем искать решение уравнения (2.76) в виде:

$$\bar{\sigma}_T = y_1 + \frac{1}{y}, \quad (2.77)$$

где y_1 – частное решение.

Предположим, что y_1 есть некая величина, не зависящая от параметра t .

$$y_1 = Y. \quad (2.78)$$

Тогда подставляя (2.77) в (2.76) получим:

$$aY^2 + bY + c = 0. \quad (2.79)$$

Разрешая это уравнение относительно Y получим два корня:

$$Y_{1,2} = \frac{\beta(Z)}{2 - a} (1 \pm \sqrt{1 - a(2 - a)}). \quad (2.80)$$

Теперь (2.76) можно свести к линейному дифференциальному уравнению:

$$\frac{d\bar{y}}{dt} + (2aY - b)\bar{y} = -a. \quad (2.81)$$

Подставляя сюда (2.80) и, с учётом (2.74), (2.75) получим уравнение:

$$\frac{d\bar{y}}{dt} + \frac{k}{2\varepsilon}(A_0 - 1)\bar{y} + \frac{k(r - a)}{4\beta(Z)\varepsilon} = 0, \quad (2.82)$$

где

$$A_0 = 1 \pm \sqrt{1 - a(2 - a)}. \quad (2.83)$$

Для простоты предположим, что материал идеально упрочняемый, тогда $\alpha = 1$ и (2.83) преобразуется к виду:

$$\frac{d\bar{y}}{dt} + \frac{k}{4\beta(Z)\varepsilon} = 0. \quad (2.84)$$

Интегрируя (2.84), получим выражение:

$$\bar{y} = -\left(\frac{kt}{4\beta(Z)\varepsilon} + c_1\right). \quad (2.83)$$

Тогда (2.77) примет вид:

$$\sigma_T = \beta(Z) - \frac{1}{\frac{kt}{4\beta(Z)\varepsilon} + c_1}. \quad (2.84)$$

Постоянную c_1 найдём из условия:

$$\bar{\sigma}_T|^{t=0} = \sigma_T^{\text{исх}}; \quad (2.85)$$

$$\sigma_T(Z, t) = \beta(Z) - \frac{1}{c_1};$$

откуда найдем c_1 :

$$c_1 = \frac{1}{-\sigma_T^{\text{исх}} + \beta(Z)}. \quad (2.86)$$

Подставляя (2.86) в (2.85), получим:

$$\sigma_T = \beta(Z) - \frac{1}{\frac{kt}{4\beta(Z)\varepsilon} + \frac{1}{\beta(Z) - \sigma_T^{\text{исх}}}}. \quad (2.87)$$

Изучим полученное нами решение. Если время упрочнения растёт, то: $\sigma_T(Z, t) \rightarrow \beta(Z)$ в пределе:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \sigma_T(Z, t) = \beta(Z). \quad (2.88)$$

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		57

Отсюда можно сделать вывод, что предел текучести никогда не превысит интенсивность нагрузочных напряжений $\beta(Z)$. Как видно из рисунка 2.7, предел текучести материала плавно растет и постепенно достигает нагрузочных напряжений, при этом, естественно зона пластичности сокращается, то есть, происходит приспособляемость материала.

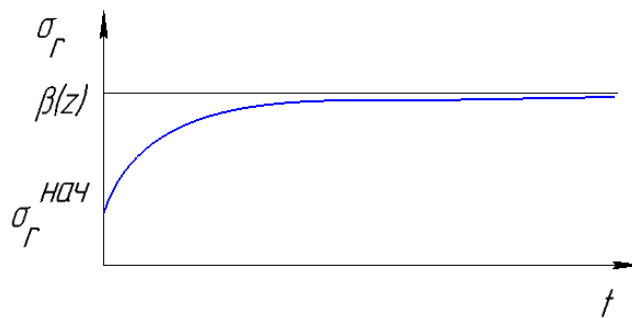


Рисунок 2.7 – Зависимость предела текучести от времени упрочнения

Рассмотрим теперь взаимосвязь остаточных напряжений и прогиба контрольных пластин Δf .

Для простоты примем в (2.74), что $\mu_r = \mu_\theta, k_r = k_\theta$, тогда получим:

$$\frac{d\overline{\sigma_x^{\Sigma \text{ост}}}(Z, t)}{dt} = \frac{2q}{\pi} \left(\frac{\theta_r(Z) - \theta_\theta(Z)}{4\mu k \sigma_T(Z, t)} \right). \quad (2.89)$$

Произведем подстановку в уравнение (2.89):

$$d = \frac{2q}{\pi} \left(\frac{\theta_r(Z) - \theta_\theta(Z)}{4\mu k} \right), \quad (2.90)$$

тогда уравнение примет вид:

$$\frac{d\overline{\sigma_x^{\Sigma \text{ост}}}(Z, t)}{dt} = \frac{d}{\sigma_T(Z, t)}. \quad (2.91)$$

Уравнение (2.87) приведем к виду:

$$\sigma_T = \frac{k\beta(Z)(\beta(Z) - \sigma_T^{\text{ИСХ}})t + 4\beta(Z)\varepsilon\sigma_T^{\text{ИСХ}}}{kt(\beta(Z) - \sigma_T^{\text{ИСХ}}) + 4\beta(Z)\varepsilon}. \quad (2.92)$$

С учётом (2.92) уравнение (2.91) примет вид:

$$\frac{d\overline{\sigma_X^{\Sigma \text{ост}}}(Z, t)}{dt} = \frac{d[kt(\beta(Z) - \sigma_T^{\text{ИСХ}}) + 4\beta(Z)\varepsilon]}{kt(\beta(Z) - \sigma_T^{\text{ИСХ}}) + 4\beta(Z)\sigma_T^{\text{ИСХ}}\varepsilon}. \quad (2.93)$$

Произведем подстановку в уравнении (2.93):

$$a = k(\beta(Z) - \sigma_T^{\text{ИСХ}}); b = 4\beta(Z)\varepsilon;$$

$$f = k\beta(Z) \cdot (\beta(Z) - \sigma_T^{\text{ИСХ}}); g = 4\beta(Z)\sigma_T^{\text{ИСХ}}\varepsilon; \quad (2.94)$$

$$\frac{d\overline{\sigma_X^{\Sigma \text{ост}}}}{dt} = d \frac{at + b}{ft + g}.$$

Произведем качественный анализ уравнения (2.94). В начальный момент времени прирост остаточных напряжений должен быть максимален, так как отсутствует наклёп, в дальнейшем он должен снижаться до какого-то предела, который легко найти из соотношения (2.94) (рисунок 2.8).

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{d\sigma(Z, t)}{dt} = d \frac{a}{f}. \quad (2.95)$$

Наличие этого предела легко объясняется существованием максимального предела упрочнения:

$$\sigma_T < \sigma_T^{\text{max}}, \quad 0 < t < \infty \quad (2.96)$$

Этот предел существует у многих материалов и объясняется его физическими свойствами. Проинтегрируем теперь равную (2.94)

$$\overline{\sigma_X^{\Sigma \text{ост}}} = d \left[\frac{at}{f} + \frac{fb - ag}{f^2} (\ln(ft + g) - \ln g) \right]. \quad (2.97)$$

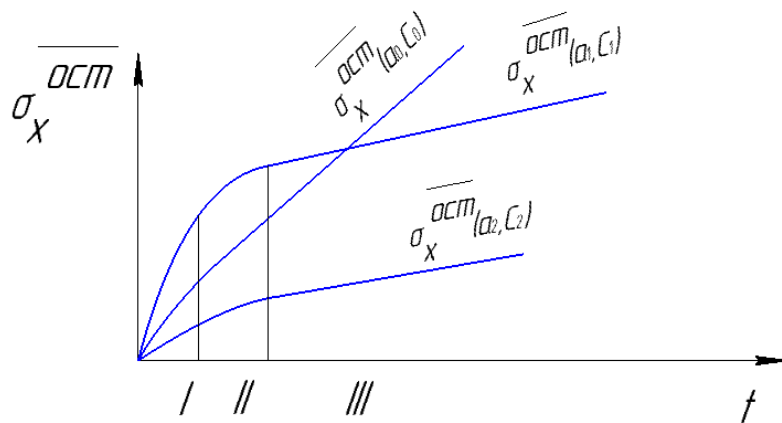


Рисунок 2.8 – Зависимость остаточных напряжений от времени упрочнения

Анализ показывает, что расчётную кривую, как экспериментальную, можно разделить на 3 фазы:

- 1 – фаза быстрого начального роста;
- 2 – переходный период;
- 3 – фаза насыщения.

На основании вышесказанного, можно сделать вывод о том, что в первом приближении, решения уравнений приспособляемости дают качественное соответствие между экспериментом и расчётом.

Выводы по разделу

1) На основании теории приспособляемости и метода локальной суперпозиции, получена система дифференциальных уравнений, описывающая процесс формирования остаточных напряжений при гидродробеструйном упрочнении.

2) Качественный анализ этой системы уравнений показал, что её решения адекватны экспериментальным данным.

3 ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ УПРОЧНЕНИЯ

3.1 Общие принципы построения модели

Как уже было сказано выше, в виду сложности дифференциальных уравнений упрочнения, необходимо привлекать численные методы для разрешения уравнений приспособляемости.

В главе 2 показано, что общее решение состоит из двух частей: решения уравнений приспособляемости и решения задачи однократного удара. Так как уравнение (2.41) первого порядка, то для их разрешения применим метод Эйлера. Модель однократного удара можно представить в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных (2.48), (2.50), (2.53), (2.54). Для их решения применением сеточно-разностный метод с двухслойной интеграционной схемой. Общее решение можно представить в виде приведенного на рисунке 3.1 алгоритма.

Проверка полученных решений также будет проводиться в два этапа. На первом этапе будет проведено тестирование задачи однократного удара, для этого будет привлечен метод делительных сеток [31, 32], а также исследование других авторов [22, 26, 52] по контактными задачам.

На втором этапе, для проверки численных решений полученных с помощью уравнений приспособляемости, будут использованы эксперименты по упрочнению прямоугольных пластин, главным критерием оценки правильности полученных решений будет являться прогиб пластин. Для анализа остаточных напряжений в поверхностном слое будет также привлекаться метод пенетрации [33].

После тестирования модели будет проведён численный анализ динамики проведения выходных технологических параметров: остаточных напряжений, твердости материала, глубины упрочненного слоя, в зависимости от режима упрочнения и будут сделаны соответствующие выводы.

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		61

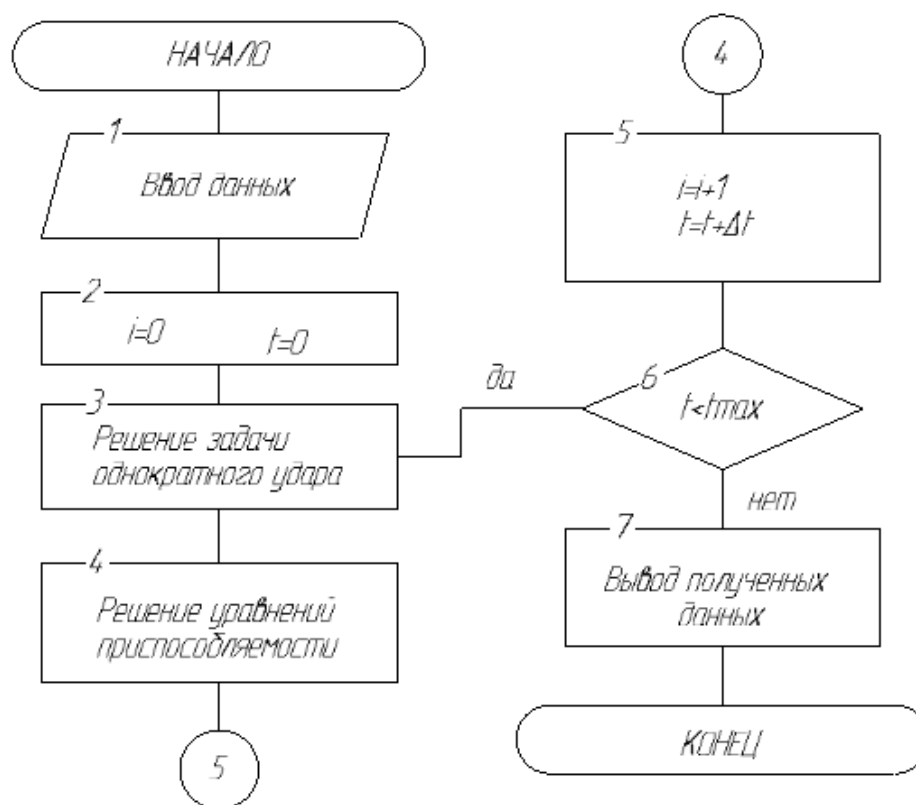


Рисунок 3.1 – Алгоритм расчета остаточных напряжений

3.2 Расчет однократного взаимодействия

3.2.1 Выбор численного метода и алгоритм

В главе 2 были представлены принципы решения задачи однократного удара, в этой главе излагаются более детальный алгоритм решения этой задачи. Так как решение уравнений приспособляемости на каждом i -ом шаге интерации требуют решения задачи однократного удара, то выгоднее всего применить итерационные методы решения, так как при этом разрешение уравнений на каждом новом шаге начинается с предыдущего решения, что повышает скорость вычислений. В частности, здесь выбрана двухслойная итерационная схема решения задачи. Основные пункты решения перечислены ниже.

1) На основании предварительно заданной глубины внедрения шара определяем радиус контакта:

$$B = \sqrt{R_{ш} \cdot D_e}, \quad (3.1)$$

где $R_{ш}$ – радиус шара;

D_e – глубина внедрения.

2) Определяем число узлов N1 в зоне контакта и проверяем попадает ли оно в требуемый диапазон, если нет, то расчёт прекращается. Это делается для того, чтобы число узлов сетки не вышло за заданный диапазон, и, с другой стороны, чтобы точность решение была достаточной.

3) Определяем координаты узлов сетки X(1), Y(1).

4) Определяем силу вдавливание шарика:

$$P = \frac{8\sigma_0 B D_e}{3(1-V)}, \quad (3.2)$$

где σ_0 – исходный модуль сдвига.

5) По заданной силе P и радиусу отпечатка B определяем упругие напряжения по формулам из работы [28].

$$\sigma_r^{\text{упр}} = \sigma_r^{\text{упр}}(r, Z); \sigma_z^{\text{упр}} = \sigma_z^{\text{упр}}(r, Z); \sigma_\theta^{\text{упр}} = \sigma_\theta^{\text{упр}}(r, Z); \quad (3.3)$$

6) На основании (3.3) находим граничные условия:

на оси $r = 0$ имеем:

$$\sigma_r = \sigma_\theta = K \left[(1+V) \left(1 - Z \arctg \frac{1}{Z} - \frac{1}{2(1+Z^2)} \right) \right]; \quad (3.4)$$
$$\sigma_z = K \frac{1}{1+Z^2}; \tau = 0.$$

На поверхности $Z = 0$ имеем $\tau = 0$

$$\sigma_r|_{r \leq b} = K \left[\sqrt{1-r^2} + \frac{1-2V}{3r^2} \left((1-r^2)^{3/2} - 1 \right) \right];$$
$$\sigma_\theta|_{r \leq b} = K \left[\sqrt{1-r^2} + \frac{1-2V}{3r^2} \left((1-r^2)^{3/2} - 1 \right) \right]; \quad (3.5)$$
$$\sigma_z|_{r \leq b} = K \sqrt{1-r^2};$$

$$\sigma_{\theta}|r > b = -\sigma_r, \quad \sigma_z|r > b = 0.$$

7) Находим граничные условия на боковой грани:

$$F_{Gb}(b, Z) = \sigma_r^{\text{упп}}(b, Z);$$

$$F_{\tau b}(b, Z) = \tau^{\text{упп}}(b, Z);$$

$$F_{GN}(r, H) = \sigma_r^{\text{упп}}(r, H);$$

$$F_{\tau N}(r, H) = \tau^{\text{упп}}(r, H),$$

(3.6)

где b, H – высота и ширина расчетной области.

8) На основании (3.5) находим упругие перемещения в узлах.

9) Для решения интерационной задачи в качестве начальных условий примем расчётные упругие напряжения, кроме того, на границе примем, что граничные условия соответствуют условиям, найденным из упругого решения (3.5) и (3.6)

10) Определим интенсивность напряжений с учетом остаточных напряжений $\overline{\sigma_X^{\text{ост}}}$:

$$\sigma_u = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_r + \overline{\sigma_X^{\text{ост}}} - \sigma_z)^2 + (\sigma_{\theta} + \overline{\sigma_X^{\text{ост}}} - \sigma_z)^2 + 6\tau^2}. \quad (3.7)$$

Для расчёта напряженного состояния в пластической области воспользуемся методом переменных параметров упругости. Согласно которому (рисунок 3.2) рассчитывается модуль сдвига σ и коэффициент Пуассона V в каждой точке области. Через σ^* и V^* обозначаются их значение в зависимости от величины σ_u .

σ и V значения из предыдущей итерации. Находим интенсивность деформаций по формуле:

$$\varepsilon_u = \frac{\sigma_u}{3} \left(\frac{1}{\sigma} + \frac{1 - 2V}{E} \right). \quad (3.8)$$

										Лист
										64
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	15.04.05.2018.582.00 ПЗ					

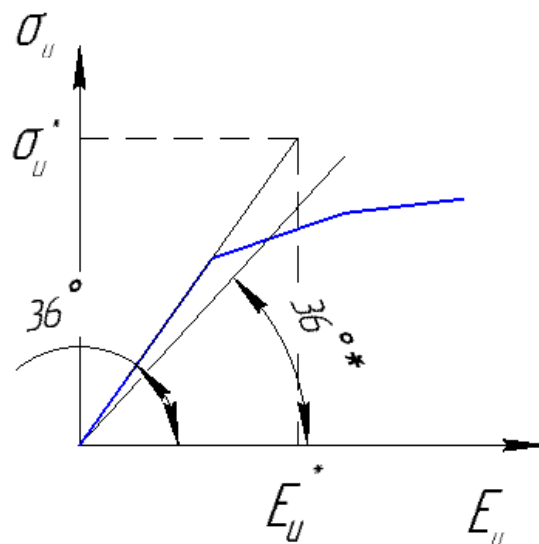


Рисунок 3.2 – Схема метода переменных параметров упругости

Далее находим интенсивность по кривой деформирования:

$$\sigma_u^* = a_n + b_n \epsilon_u, \quad (3.9)$$

где n – номер участка ломанной, которая аппроксимирует кривую деформирования. После этого, определяем новое значение модуля сдвига по формуле.

$$\sigma^* = \frac{1}{\frac{3\epsilon_u}{\sigma_u^*} + \frac{1-2\nu}{E}}. \quad (3.10)$$

11) По перемещениям находим деформации, затем по полученным упругим деформациям и пересчитанному модулю упругости вычисляем напряжения в узлах.

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \lambda\theta + 2\sigma\epsilon_r; \\ \sigma_\theta &= \lambda\theta + 2\sigma\epsilon_\theta; \\ \sigma_z &= \lambda\theta + 2\sigma\epsilon_z. \end{aligned} \quad (3.11)$$

12) Для определения перемещений в узлах сетки, необходимо составить систему линейных уравнений с фиксированными параметрами упругости:

$$AY = F, \quad (3.12)$$

где Y – массив радиальных и осевых перемещений;

F – граничные условия, которые определяются из уравнений (3.6)

а) Для того, чтобы найти матрицу A , необходимо уравнения равновесия выразить в виде функция перемещения. Подставляя уравнение (3.11) в уравнения равновесия получим систему дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\begin{aligned} \nabla^2 u + \frac{1}{1-2V} \cdot \frac{d}{dx} \left(\frac{du}{dx} + \frac{dV}{dy} + \frac{d\omega}{dz} \right) + \frac{F_x}{\mu} &= 0; \\ \nabla^2 V + \frac{1}{1-2V} \cdot \frac{d}{dy} \left(\frac{du}{dx} + \frac{dV}{dy} + \frac{d\omega}{dz} \right) + \frac{F_y}{\mu} &= 0; \\ \nabla^2 \omega + \frac{1}{1-2V} \cdot \frac{d}{dz} \left(\frac{du}{dx} + \frac{dV}{dy} + \frac{d\omega}{dz} \right) + \frac{F_z}{\mu} &= 0. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Производные в (3.13) находятся по трём точкам:

$$\begin{aligned} y'(x_1) &= \frac{1}{H} (-y_3 + 4y_2 - 3y_1); \\ y'(x_i) &= \frac{1}{H} (y_{i+1} - y_{i-1}), 1 < i < n; \\ y'(x_n) &= \frac{1}{H} (3y_n - 4y_{n-1} + y_{n-2}), \end{aligned} \quad (3.14)$$

здесь $y_i = y(x_i)$, H – удвоенный шаг сетки.

Подставляя выражение (3.14) в уравнение равновесия (3.13) и представляя его в виде произведения матриц (3.12), определим матрицу A .

б) Для решения уравнения (3.12) применим трехслойный итерационный метод [10]. Согласно этому методу, необходимо вычислить остаток по формуле:

$$r_k = AY_k - F. \quad (3.15)$$

с) Вычисляем вектор столбец. A_{rk} . Для этого воспользуемся уравнениями (3.12) и (3.14), однако вместо перемещений подставим туда остаток.

д) Вычислим коэффициенты A, E, F и если $K > 1$, то вычисляем коэффициент B, C, D:

$$A = (A_{rk}, r_k); B = (A_{rk}, r_{k-1});$$

$$C = (r_k, r_k - r_{k-1}); D = (r_{k-1}, r_k - r_{k-1}); \quad (3.16)$$

$$E = (A_{rk}, A_{rk}); F = (r_k, r_k); F_{st} = (r_{k-1}, r_{k-1}).$$

е) Вычисляем новый вектор решения Y на k -ой итерации по формулам:

$$Y^{(1)} = Y^{(0)} - \tau \cdot r_0, \text{ при } k = 1 \quad (3.17)$$

$$Y^{(k+1)} = Y^{(k-1)} + \alpha(Y^{(k)} - Y^{(k-1)}) - \alpha\tau r_k, \text{ при } k \geq 2,$$

где

$$\alpha_k = \frac{(A - B)B - DE}{(C - D)E - (A - B)^2}; \alpha_1 = 1; \quad (3.18)$$

$$\tau_1 = \frac{A}{E}; \tau_k = \frac{B}{E\alpha_k} + \frac{A - B}{E}, k \geq 2. \quad (3.19)$$

Так как решается контактная задача, то в области контакты приходится жестко фиксировать перемещение узлов. Для того, чтобы в итерационном процессе их значения не менялись, невязка в этих узлах принудительно приравнивается нулю, что приводит к автоматической фиксации перемещений в этих узлах.

Итерационный процесс идет до тех пор, пока невязка не будет достаточно малой, а именно:

$$\left| \frac{F}{F_{st}} - 1 \right| < \varepsilon, \quad (3.20)$$

где ε – относительная точность.

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		67

13) Вычисляем новый модуль упругости по формулам (3.8), (3.9), (3.10).
Находим изменение модуля упругости за $(K + 1)$ итерацию.

Далее проверяем условие: $\Delta E < \Delta E_g$, где ΔE – максимальное приращение модуля сдвига; ΔE_g – максимальная погрешность приращения.

Если условие не выполняется, то переходим к пункту (10) и повторяем расчёт снова, в противном случае переходим к следующему пункту. Этим циклом ограничивается решение упругопластической задачи при данной глубине внедрения шарика.

14) Вычисляем энергию \mathcal{E} полупространства;

$$\mathcal{E} = \int_V (\mathcal{E}_o + \mathcal{E}_\phi) dx dy dz;$$

$$\mathcal{E}_o = \frac{1 - 2\nu^*}{6E^*} (\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z)^2; \quad (3.21)$$

$$\mathcal{E}_\phi = \frac{\sigma_u \varepsilon_u}{2},$$

где \mathcal{E}_o – энергия объемной деформации;

\mathcal{E}_ϕ – энергия формообразования.

15) Проверяем не соответствует ли кинетическая энергия шара A_o энергии полупространства. Если нет, то переходим к пункту 17, в противном случае переходим к следующему пункту.

16) Задаем новую глубину внедрения шариков в полупространство, при этом:

$$h = h + \Delta h, \text{ если } \mathcal{E} < A_o;$$

$$h = h - \Delta h, \text{ если } \mathcal{E} > A_o, \quad (3.22)$$

где h – глубина внедрения шарика;

Δh – приращение глубины внедрения.

Для осуществления сходимости шаг вычисляется по следующей формуле:

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		68

$$\text{если } \mathcal{E}(h + \Delta h) > A_o \text{ и } \mathcal{E}(h) < A_o, \text{ то } \Delta h = \Delta h/2. \quad (3.23)$$

После перерасчета глубины внедрения переходим к пункту 1 алгоритма.

17) Вычисляем остаточные напряжения по формуле:

$$\sigma_{ij}^{\text{ост}} = \sigma_{ij}^H - \sigma_{ij}^{\text{упр}}, \quad (3.24)$$

где σ_{ij}^H – нагрузочные напряжения;

$\sigma_{ij}^{\text{упр}}$ – напряжения, разгрузки, полученные из упругого решения.

Решения, получаемые из алгоритма основаны на том, что на достаточно большом расстоянии от зоны контакта упругопластическое решение сходится к упругому. Это предположение позволяет ограничить расчетную область цилиндром радиусом В и высотой Н, а в узлах, расположенных на внешней границе цилиндра задать перемещения, полученные из упругого решения.

3.2.2 Результаты расчета и сравнение с экспериментальными данными

На рисунке 3.3 представлена картина распределения нагрузочных напряжений с $K_{\text{проп}} = 1$, радиусом шарика $R_{\text{ш}} = 1,25$ мм. Как видно из рисунка 3.4а, в радиальных напряжениях можно условно выделить три зоны:

- 1) Зона сжимающих напряжений, которая начинается с центра отпечатка, и по диагонали к поверхности распространяется в глубь материала.
- 2) Зона поверхностных растягивающих напряжений, которая начинается с границы отпечатка и распространяется параллельно поверхности.
- 3) Зона глубинных растягивающих напряжений начинается с глубины $3R_{\text{отп}}$ и распространяется вглубь материала, выше её располагается зона зажимающих напряжений.

Для осевых нагрузочных напряжений, как правило, можно выделить две зоны:

- 1) Зона мощных сжимающих напряжений, которое начинается с поверхности под отпечатком и распространяется вглубь материала.

										Лист
										69
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	15.04.05.2018.582.00 ПЗ					

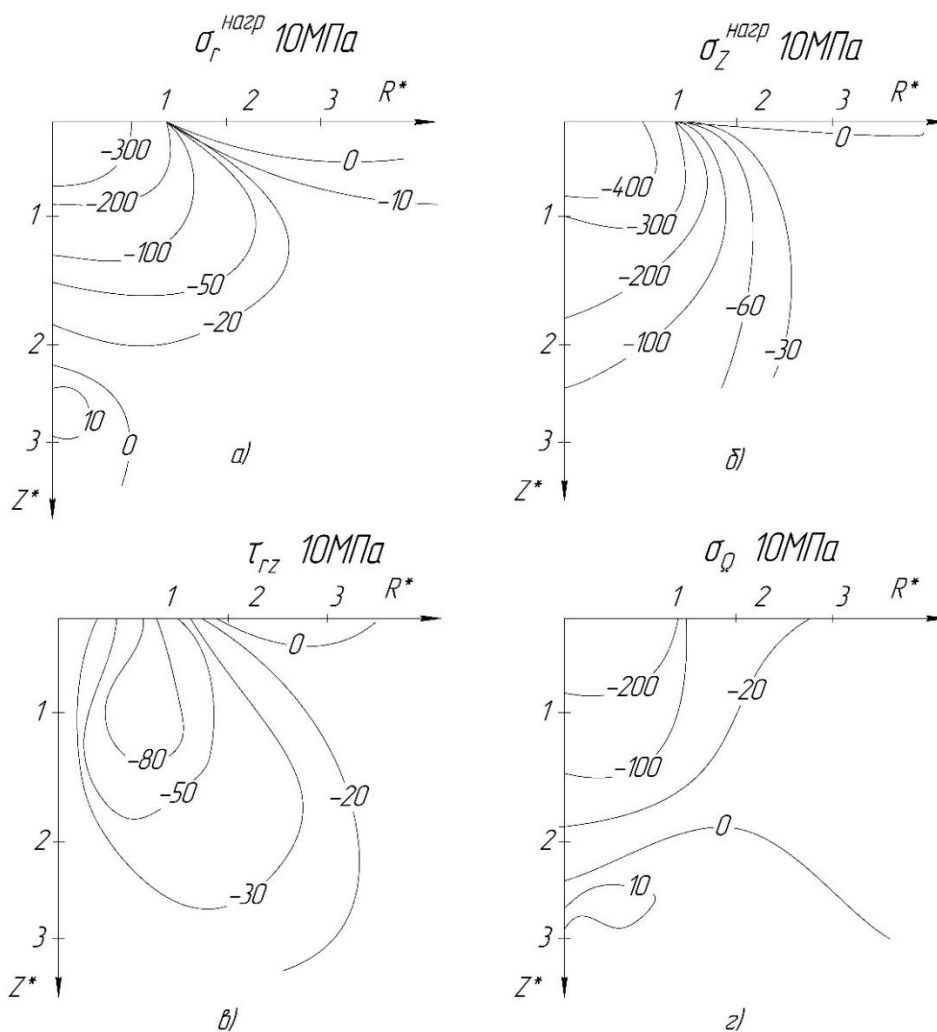


Рисунок 3.3 – Результаты расчета нагрузочных напряжений для однократного отпечатка

2) Небольшая подповерхностная зона растягивающих напряжений, которая начинается примерно с границы отпечатка.

Такое распределение нагрузочных напряжений можно объяснить при помощи сеточной модели. Для этого необходимо рассмотреть материал с идеально-пластическими свойствами и на боковую грань нанести сетку с равномерными интервалами между узлами. После выдавливания сферы, сетка деформируется, как показано на рисунке 3.4. В процессе внедрения шарика, материал пластических деформируются и смещается по радиусу от центра. При этом поверхностный слой вне зоны контакта растягивается, что приводит к растягивающим радиальным напряжениям на поверхности.

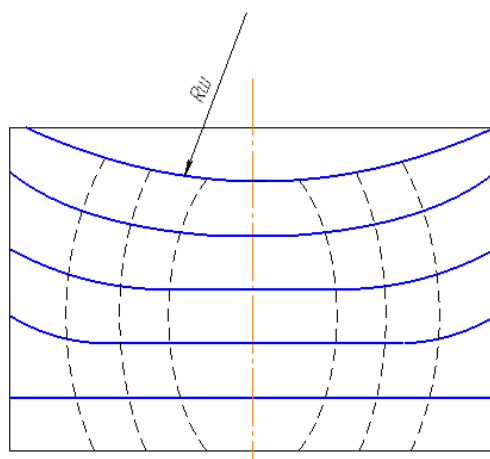


Рисунок 3.4 – Схема вдавливания шарика в идеально-пластический материал

Под областью контакта, из-за смещения поверхностных слоев находится сжимающее напряжение, однако там, где ее влияние ослабевает на глубине $(2 - 3)R_{отп}$, как видно из рисунка 3.4, волокна также растягиваются в радиальном направлении, что и приводит к образованию глубинной зоны растягивающих напряжений.

Для осевых напряжений картина будет несколько иной. Под зоной контакта, за счет внедрения шарика, материал смещается вглубь, при этом слои сжимаются и образуются сжимающие напряжения. Вне области контакта ситуация изменяется, здесь возникает слой растягивающих напряжений. Это происходит из-за того, что слои, находящиеся под областью контакта, увлекают за собой окружающий материал, но так как и здесь поверхность свободна от нагрузки, то часть слоев может оказаться растянутыми, что и приводит к небольшой растягивающей зоне нагрузочных напряжений.

Для остаточных напряжений, которое вычисляется по теореме разгрузки, из работы [22] видно, что характер распределения напряжений будет другой. Для радиальных остаточных напряжений характерно наличие двух зон: растягивающих и сжимающих напряжений. Зона растягивающих напряжений образуется непосредственно под отпечатком и простирается вглубь до $0,5R_{отп}$. Происхождение этой зоны связано с увеличением площади поверхностных слоёв за счет формирования отпечатка. С глубины $0,5R_{отп}$ до $3,5R_{отп}$ находится зона

сжимающих напряжений, она образуется за счет пластического смещения материала по радиусу от оси симметрии опечатка, так как при разгрузке упругие слои окружающие пластическую зону пытаются восстановить свои размеры и сжимают центральную зону под областью контакта.

Для остаточных осевых напряжений можно также выделить две зоны растягивающих и сжимающих напряжений. Наличие большой растягивающей зоны под отпечатком, несмотря на наличие лунки, можно объяснить следующим образом: при пластическом внедрении шариков полупространство материал оттекает из центральной зоны в радиальном направлении, а при упругой разгрузке обратно пластического смещения не происходит, что и приводит к сильным растягивающим напряжениям под областью контакта. И наоборот по бокам, вне области контакта, за счёт смещения туда материала происходит наведение большой зона сжимающих напряжений.

Не менее важными характеристиками преследования однократного удара, наряду с остаточными напряжениями, являются напряжения в зоне контакта и характер зоны пластичности. На рисунке 3.5 показана картина распределения контактных напряжений для материалов с различным пределом текучести. Как видно из рисунка, для более пластичных материалов эпюра контактных напряжений становится более пологой и наоборот, для менее пластичных материалов эпюра стремится к параболическому закону, который соответствует упругому случаю. Такой эффект описан в работе [11] и работах других авторов.

На рисунке 3.6 показано распределение зоны пластичности при различных скоростях полета шарика. Нетрудно заметить, что глубина пластической зоны растет по линейному закону в зависимости от скорости, что соответствует экспериментальным исследованием.

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		72

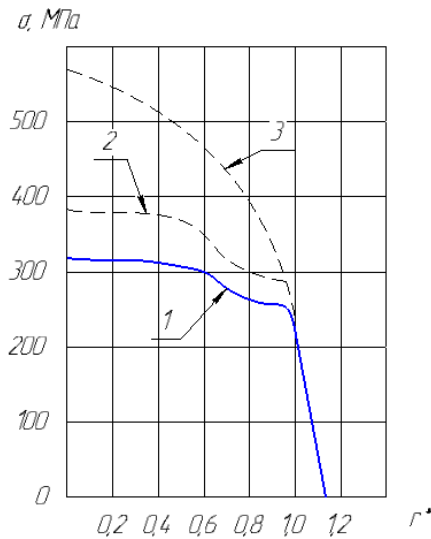


Рисунок 3.5 – Распределение напряжений в зоне контакта: 1) $\sigma_T = 546$ МПа,
2) $\sigma_T = 780$ МПа, 3) $\sigma_T = 1560$ МПа, $V = 7,5$ м/с, $R = 1,25$ мм

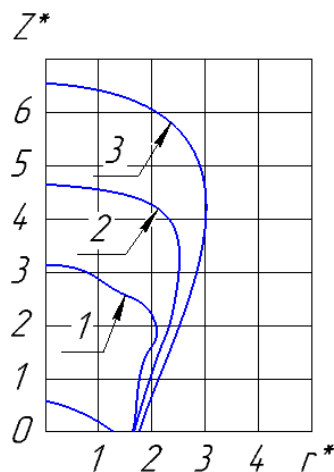


Рисунок 3.6 – Зона пластичности: 1) $\sigma_T = 1000$ МПа, 2) $\sigma_T = 750$ МПа,
3) $\sigma_T = 500$ МПа

3.3 Расчет с учетом уравнений приспособляемости

Для численного решения уравнений (2.41) в них необходимо сменить dt на Δt , где Δt – должно быть достаточно мало, тогда:

$$\overline{\sigma_T}(Z, t + \Delta t) = \overline{\sigma_T}(Z, t) + 2\pi q \Delta t \left(F(Z, \alpha) - \frac{l^2}{2} \overline{\sigma_T} \right); \quad (3.25)$$

$$\overline{\sigma^{\Sigma_{\text{ост}}}}(Z, t + \Delta t) = \overline{\sigma_X^{\Sigma_{\text{ост}}}} + \frac{2}{\pi} \Delta t q (F_r + F_\theta).$$

Решая многократно данные уравнения, можно найти решения для точек: $t_1, t_2, \dots, t_i, t_{i+1}, \dots, t_n$, где $t_{i+1} = t_i + \Delta t$. В момент времени $t = 0$, необходимо учесть уравнение (2.43).

Исходя из систем уравнений (3.25) алгоритм численного решения можно представить в следующем виде:

- 1) на основании (2.43) определяем начальное состояние материала:

$$\begin{aligned} \overline{\sigma}_T(Z, t)|^{t=0} &= \sigma_T, Z \in [0, +\infty]; \\ \overline{\sigma}_X^{\Sigma \text{ост}}(Z, t)|^{t=0} &= 0, Z \in [0, +\infty]; \end{aligned} \quad (3.26)$$

- 2) решаем упругопластическую задачу для однократного воздействия шара с контроллером при заданных полях распределения $\overline{\sigma}_T$ и $\overline{\sigma}_X^{\Sigma \text{ост}}$;

- 3) производим численное интегрирование по формулам (2.42) с учетом первой формулы (2.43);

- 4) Вычисляем величины $A(Z)$ и $B(Z)$ по формулам:

$$\begin{aligned} A(Z) &= 2\pi q \left[F(Z, \alpha) - \frac{l^2}{2} \sigma_T(Z, t) \right]; \\ B(Z) &= \frac{2q}{\pi} (F_r + F_\theta); \end{aligned} \quad (3.27)$$

- 5) производим вычисления новых значений $\overline{\sigma}_T$ и $\overline{\sigma}_X^{\Sigma \text{ост}}$:

$$\begin{aligned} t_{i+1} &= t_i + \Delta t; \\ \overline{\sigma}_T(Z, t_{i+1}) &= \overline{\sigma}_T(Z, t_i) + A(Z)\Delta t; \\ \overline{\sigma}_X^{\Sigma \text{ост}}(Z, t_{i+1}) &= \overline{\sigma}_X^{\Sigma \text{ост}}(Z, t_i) + \beta(Z)\Delta t; \end{aligned} \quad (3.28)$$

- 6) переходим следующий узел $i = i + 1$, и если $i \leq n$, где n – число расчетных точек, то переходим к пункту 2, в противном случае расчет окончен.

По данному алгоритму производились численные расчеты, было исследовано влияние на суммарные остаточные напряжения предела текучести, скорость полёта шарика и радиус шарика. На рисунке 3.7 показана зависимость формы остаточных напряжений от скорости полёта шарика. Как видно, на кривой условно можно выделить три участка:

- 1) тонкий поверхностный слой растягивающих напряжений, который располагаются до глубины 0,04 мм.
- 2) Слой сжимающих напряжений располагается на глубине 0,04-0,05 мм.
- 3) Глубинный слой растягивающих напряжений.

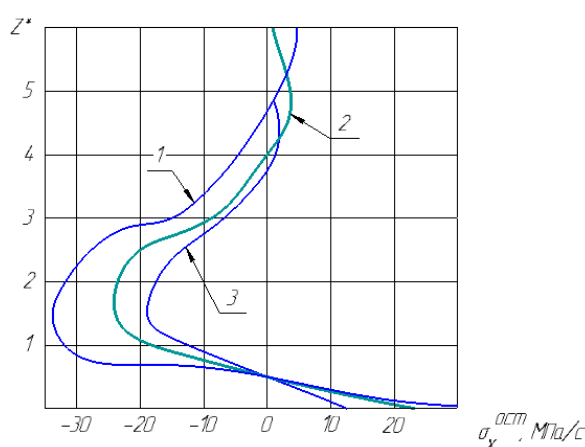


Рисунок 3.7 – Эпюра остаточных напряжений: 1) $V = 10$ м/с, 2) $V = 7,5$ м/с,
3) $V = 6,2$ м/с

Таким образом, кривая остаточных напряжений имеет форму с четко выраженным подповерхностным максимумом. Такой вид кривой характерен для экспериментально полученных эпюр остаточных напряжений. Качественное объяснение наличия зоны поверхностных растягивающих напряжений было дано ещё в работе [16].

Численный эксперимент показал, что с ростом скорости пиковые остаточные напряжения не смещаются вглубь, как это предполагалось. На рисунке 3.8 показана зависимость остаточных напряжений от предела текучести материала при прочих одинаковых параметрах. Как видно из рисунка, с уменьшением предела текучести максимум смещается вглубь материала.

Величина же максимальных остаточных напряжений сперва растет, потом падает, с постоянным уширением зоны сжимающих напряжений.

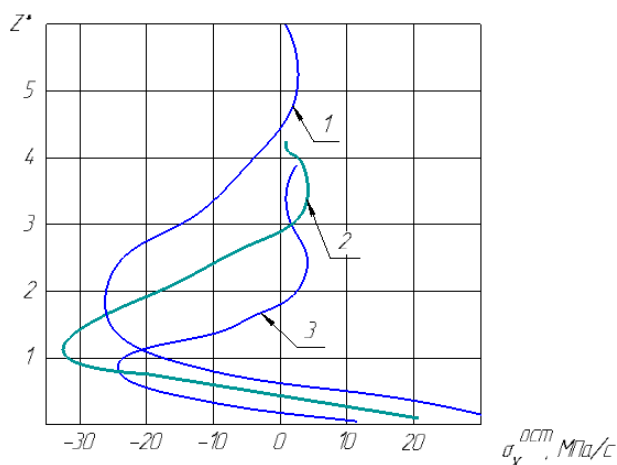


Рисунок 3.8 – Зависимость остаточных напряжений от предела текучести материала: 1) $\sigma_T = 560$ МПа, 2) $\sigma_T = 1090$ МПа, 3) $\sigma_T = 1560$ МПа, $V = 7,5$ м/с, $R = 1,25$ мм

Как видно из рисунков 3.7 и 3.8, форма кривых полученных при помощи численных расчетов хорошо совпадает с экспериментом. Для анализа количественного совпадения был привлечён косвенный метод, основанный на измерении прогиба контрольных пластин. По этому методу приготавливаются прямоугольные пластины из требуемого материала и подвергаются упрочнению, по полученному в результате прогибу пластин, можно судить о величине остаточных напряжений, образующихся в пластине.

При численном расчёте и эксперименте, для материала с пределом текучести $\sigma_T = 500$ МПа, получены результаты рисунок 3.9, дающие хорошее совпадение расчетных и экспериментальных прогибов.

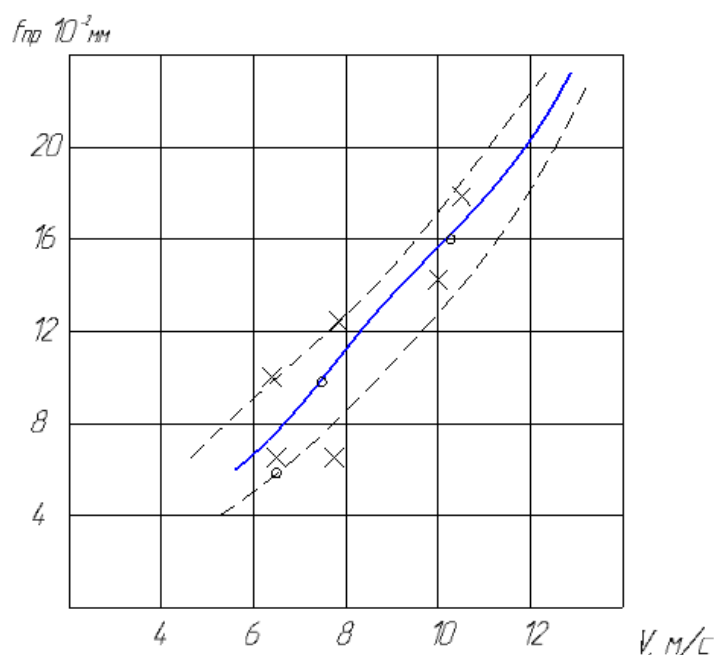


Рисунок 3.9 – Сравнение численных расчетов с экспериментальными измерениями остаточных напряжений по прогибу пластин:
 × – эксперимент, ○ – численный расчет, – – – граница интервала разброса значений, — — — математическое ожидание

3.4 Влияние механизмов приспособляемости на процесс упрочнения

Как показали численные расчеты, основную роль в приспособляемости играет наклёп материала. В данной модели он измеряется двумя взаимозависимыми коэффициентами α и β , которые определяются по формулам (2.20) и (2.21).

На рисунке 3.10 изображена зависимость прогиба пластин от времени упрочнения при численном расчёте и экспериментальном измерении для закаленной стали. Из рисунка видно, что подбором коэффициента упрочнения β можно достичь хорошего совпадения с экспериментом. Прогиб пластин определялся по формуле:

$$f_{\text{пр}} = \frac{M_{\text{изг}} \alpha \beta}{8 E Y_{\text{X}}}, \quad (3.29)$$

где $M_{\text{изг}}$ – изгибающий момент, возникающий за счёт сжимающих напряжений;

α – длина базы измерения прогиба пластин;

β – длина базы упрочнения;

E – модуль упругости материала;

Y_x – осевой момент инерции пластины.

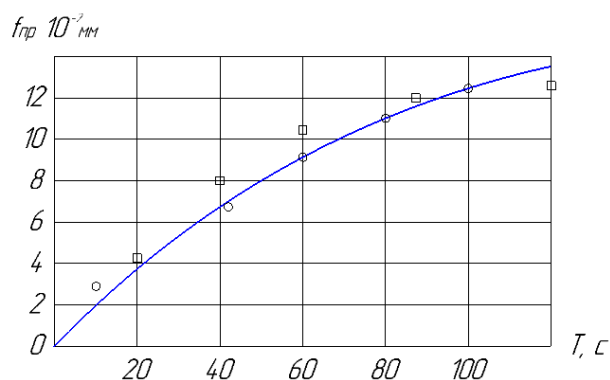


Рисунок 3.10 – Зависимость прогиба пластин от времени упрочнения

$\sigma_T = 500$ МПа, $V = 7,5$ м/с, $R = 1,25$ мм, $q = 0,51$ шт/с · мм,

○ – численный расчет, □ – эксперимент

Изгибающий момент находится по формуле:

$$M_{\text{изг}} = \int_0^{\frac{H}{2}} \overline{\sigma_x^{\Sigma \text{ост}}} (Z) B Z dz, \quad (3.30)$$

где $\overline{\sigma_x^{\Sigma \text{ост}}}$ – суммарные средние остаточные напряжения, полученные их численного расчёта;

B – ширина пластины.

На рисунке 3.11 изображена зависимость эпюры остаточных напряжений от времени упрочнения [10]. Можно отметить, что пик максимальных остаточных напряжений постепенно стабилизируется, а ширина зоны сжимающих напряжений не меняется по времени.

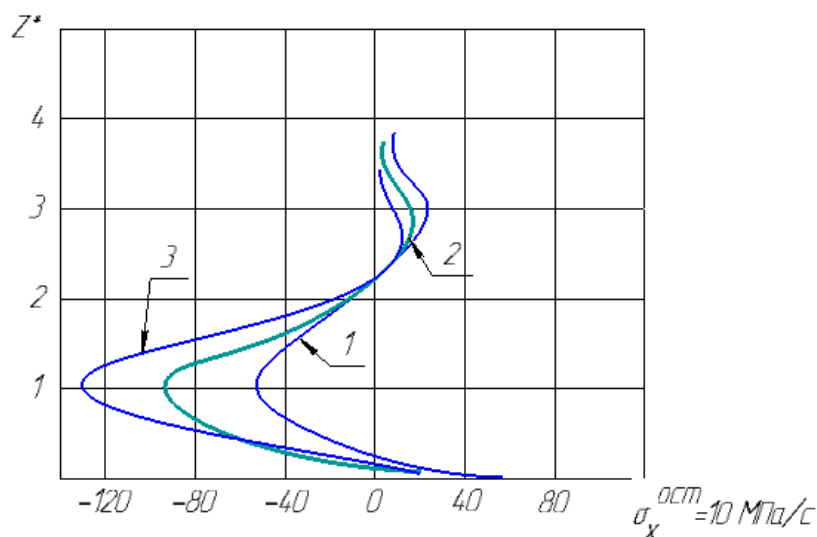


Рисунок 3.11 – Зависимость остаточных напряжений от времени упрочнения:

- 1) $t = 24 \text{ с}$, 2) $t = 48 \text{ с}$, 3) $t = 72 \text{ с}$

3.5 Анализ численных расчетов

Как показано в пунктах 3.2 и 3.3, при соответствующем подборе коэффициентов, численные расчеты дают хорошее совпадение между экспериментом и расчётом, как при однократном соударении, так и при многократном. Однако, точность решений во многом зависит от точности определения параметров упрочнения – коэффициентов α и β и диаграммы упрочнения $\sigma_u = \sigma_u(\epsilon_u)$. Кроме того, необходимо учитывать значительный разброс характеристик материала даже в одной партии деталей. Поэтому сравнение экспериментов и расчетов, строго говоря, можно производить только после построения доверительного интервала для остаточных напряжений.

Расчёты показывают, что наиболее неоднозначным на остаточные напряжения влияет предел текучести материала с ярко выраженным пиком и небольшой глубиной залегания для закаленных материалов, и отсутствием ярко выраженного пика с постепенным расширением зоны остаточных напряжений для незакаленных материалов.

Также на основании расчетов можно сделать вывод, что глубина залегания остаточных напряжений зависит только от свойств материала и кинетической

																			Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата															79

энергии упрочнения и меньше зависит от времени упрочнения.

Наличие тонкой растягивающей зоны на поверхности упрочняемых материалов, говорит о присутствии дефектного слоя на поверхности. Поэтому для особо ответственных деталей можно порекомендовать снятие поверхностного слоя после процесса упрочнения, например, электрополированием, что может привести к увеличению долговечности упрочненного материала.

Выводы по разделу

1) Анализ численных расчетов однократного удара и их сравнение с экспериментом, а также с расчетами проводимыми другими авторами показали, что между ними наблюдается хорошее соответствие.

2) Данная модель может быть положена в основу расчета многократного воздействия шариков на обрабатываемую поверхность.

3) Установлена ясная физическая связь между остаточными напряжениями и временем и упрочнения.

4) Численные расчеты подтвердили, ранее установленный экспериментально, факт о наличии тонкой растягивающей плёнки на поверхности.

5) Установлен характер распределения остаточных напряжений в зависимости от предела текучести материала.

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		80

4 РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ ДЛЯ ГДУ. ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ГДУ

4.1 Разработка установки для гидродробеструйного упрочнения

4.1.1 Описание и принцип работы установки для гидродробеструйного упрочнения

Установка для гидродробеструйного упрочнения относится к области машиностроения и предназначена для упрочнения изделий с фасонными поверхностями. На рисунках 4.1, 4.2 показан общий вид установки, на рисунке 4.3 сечение шпинделя с упрочняемым изделием. Фотографии установки представлены в приложении А.

Установка содержит камеру 1 для упрочнения, масляный бак 2 с насосом 3, двигатель 4, центробежный вентилятор 5 с двигателем 6 для отсоса из камеры очищенного масляного тумана и нагретого пара, блок управления 7, раму 8 для установки и удержания шпинделя 9 после поворота в вертикальной плоскости, шпиндель 9 для установки и закрепления упрочняемого изделия 10 и сообщения ему вращения и линейного перемещения. Камера закрывается крышкой 11, которая крепится винтовыми зажимами 12.

При закрытии крышки концевой выключатель 34 разблокирует цепи всех приводов. Масло от насоса 3, через фильтр 13 и редукционный клапан 33 нагнетается в сопло–эжектор 14. Узел с соплом крепится винтами 15. Подшипниковые шарики для упрочнения находятся в нижней части камеры. Боковые стенки дна камеры имеют прорези для стекания масла в бак, через фильтр 35. Сопла меняются в зависимости от размера применяемых шариков.

На шпинделе 9 крепится приспособление 16 для крепления изделия 10. Вращение шпинделя обеспечивается от электродвигателя 17 через редуктор 18, выходная шестерня которого передает вращение зубчатому колесу 19, запрессованному на шпиндель 9. Линейное перемещение шпинделя 9 обеспечивается от аналогичного электродвигателя через аналогичный редуктор,

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		81

выходная шестерня которого передает вращение на шестерню-гайку 20, которая при вращении шестерни-гайки 20 перемещается по винтовой нарезке 21 шпинделя 9. На шпинделе 9 имеется сфера 22, входящая в отверстие рамы 8, рама 8 крепится к корпусу камеры 1 планками 30 и винтами 23. Сфера шпинделя 9 удерживается входящим в отверстия 24 штырями рамы 8. Во время наладки при завинчивании гаек 25 на тягах 26, входящих в проушины 27 рамы 8, шпиндель 9 поворачивается в вертикальной плоскости. Для изменения вертикального положения (расстояния шпинделя 9 от сопла) относительно основания камеры, используется винт 36. Диск 28 переключает конечные выключатели 29, которые перемещаясь с линейкой 31, реверсируют перемещение шпинделя 9, переключая привод перемещения. Переключатели 29 при наладке устанавливаются в нужное положение. Давление в гидросистеме измеряется манометром 32.

Принцип работы гидродробеструйной установки заключается в следующем: при наладке производится наполнение трансформаторным маслом бака 2, крепление изделия 10 на приспособлении 16 шпинделя 9, установка конечных выключателей 29 на линейке 31, установка шпинделя 9 на нужный угол в вертикальной плоскости, а также установка на нужном расстоянии от сопла. В камеру засыпаются шарики нужного по техпроцессу размера, закрывается крышка 11. Затем включаются привод вращения изделия и привод насоса, при необходимости включается привод линейного перемещения изделия. Редукционным клапаном устанавливается необходимое по техпроцессу давление. Расход шариков зависит от установленного сменного сопла, типоразмер сопла определяется, кроме того, размером применяемых шариков. Размер шариков определяется техпроцессом. После заданного времени обработки приводы перемещений и насоса выключаются, включается привод центробежного вентилятора. Через 5 минут можно открывать крышку камеры и устанавливать новое изделие.

Двигатели приводов вращения и перемещения шпинделя могут быть установлены регулируемые, это расширит возможности назначения режимов

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		82

обработки. На линейку могут быть установлены конечные выключатели угла поворота шпинделя, для их переключения на диск 28 необходимо установить упор.

На рисунке 1.4 представлена гидравлическая схема, показывающая направление движение жидкости установки, и порядок расположение насоса фильтра, клапана агрегата. Чистое трансформаторное масло заливается в бак 1, далее запускается электродвигатель и насос 2 поднимает масло по трубе к соплу 6 через предохранительный клапан 3 с манометром 4, регулируемой дроссель 5. При избыточном давлении предохранительный клапан сбрасывает масло обратно в бак. После прохождения сопла, масло из корпуса установки 7 по трубе попадает в бак через фильтр 8.

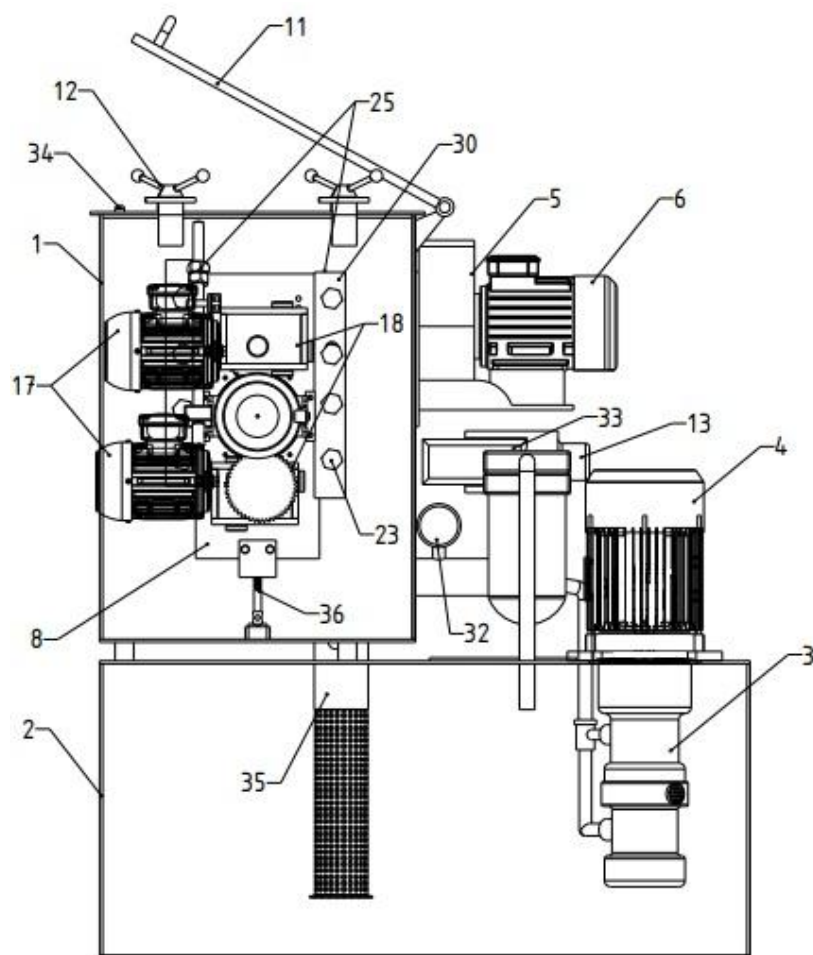


Рисунок 4.1 – Установка для ГДУ (вид спереди)

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

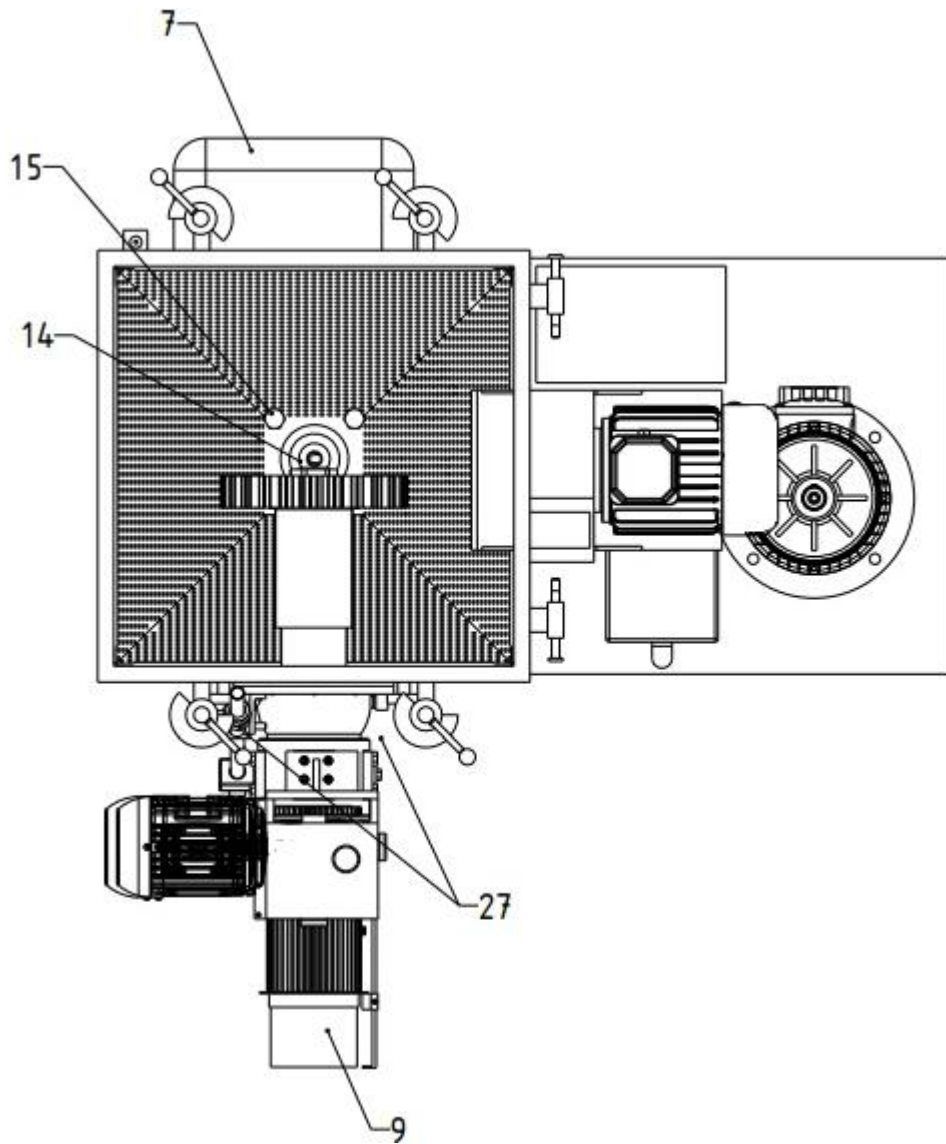


Рисунок 4.2 – Установка для ГДУ (вид сверху)

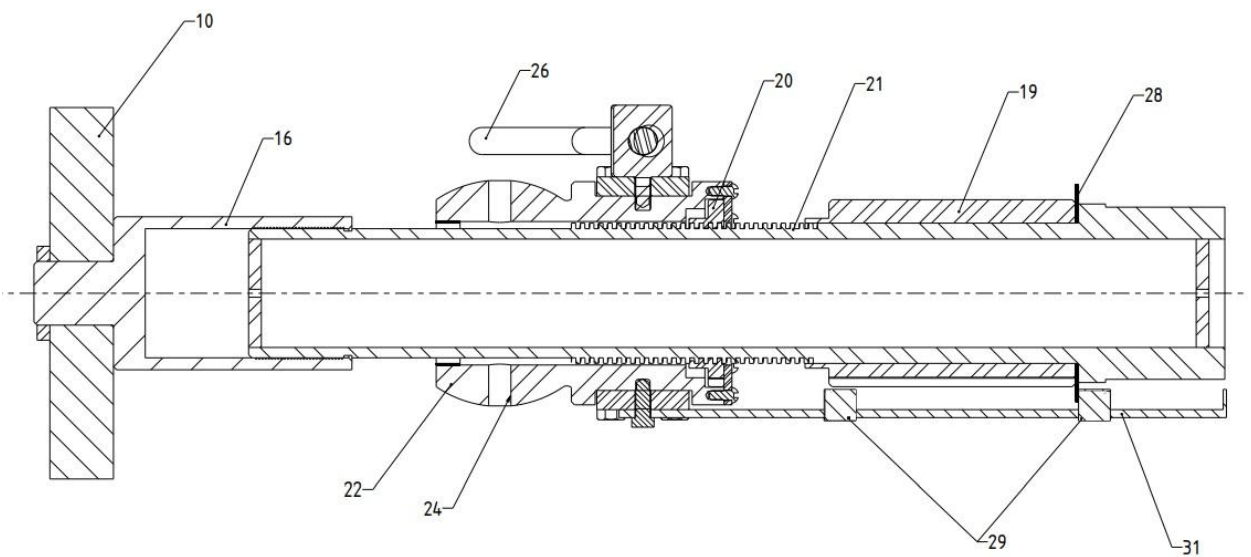


Рисунок 4.3 – Сечение шпинделя

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.05.2018.582.00 ПЗ

Лист

84

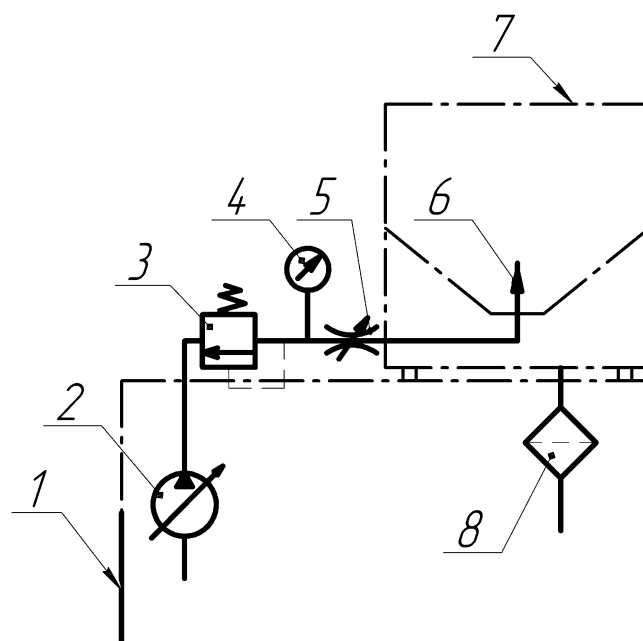


Рисунок 4.4 – Гидросхема установки для ГДУ

4.1.2 Разработка инструкции работы с установкой

Для успешного выполнения операций гидродробеструйного упрочнения деталей, на сконструированной установке, требуется разработать пошаговый алгоритм действий, который будет представлен в виде блок-схемы приложение Б.

1 Перед началом работы на установке, оператор должен получить управляющую программу (УП), деталь или партию типовых деталей, требующих обработки, и приспособление для закрепления детали на шпинделе установки.

2 Далее оператор проводит внешний осмотр установки:

- выявляет объем подготовительных работ;
- осматривает установку на наличие дефектов;
- проверяет подключена ли установка к сети.

3 Оператор проверяет уровень трансформаторного масла в установке, если его количества недостаточно, то добавляет масло до требуемого уровня по соответствующей шкале.

4 Проводится осмотр установленного сопла, если сопло отсутствует или установлено сопло под диаметр дроби, не соответствующей технологическому процессу, оператор меняет сопло, согласно документации.

5 Рабочий проводит осмотр дроби, измеряя диаметр и количество шариков, если требуется, то заменяет дробь согласно технологическому процессу.

6 Оператор осматривает приспособление на целостность, если требуется, то производит замену/установку приспособления на полученное.

7 Далее устанавливается и закрепляется деталь согласно чертежу.

8 Оператор настраивает положения детали, регулируя угол установки шпинделя, и положение конечных элементов, ограничивающих длину хода двигателя.

9 Закрывается крышка и фиксируется советующими зажимами.

10 Оператор включает установку, если запуск не произошел, требуется открыть крышку, проверить концевой выключатель, закрыть и зафиксировать крышку и выполнить включение установки. В случае если установка не запускается завершить операцию и сообщить мастеру.

11 После включения установки запускается управляющая программа, проверяющая работоспособность масляного насоса 12, электрических двигателей 13, изменяя частоту и направления работы двигателей 14, далее запускается обработка детали. Если один из проверяемых аппаратов не работает соответствующе, рабочий завершает операцию и об этом сообщается мастеру.

15 Если согласно технологическому процессу, во время обработки, требуется изменение угла шпинделя, рабочий регулирует его.

16 По истечению определенного времени управляющая программа останавливает масляный насос и электродвигатели, если это не происходит оператор отключает установку 17, завершая операцию. Снятие детали происходит по прошествии 30 минут после отключения.

18 После отключения насоса и двигателей, излишнее давление масла сбрасывается через клапан в бак. Если это не происходит оператор, используя манометр, сравнивает показания с необходимым. Когда манометр показывает, что давление превышает допустимые показания, то выполняется пункт 17. Если же давление в норме выполняется следующий шаг 19.

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		86

19 Запускается вытяжной центробежный вентилятор для отсоса из камеры очищенного масляного тумана и нагретого пара.

Далее оператор отключает установку 20, открывает крышку 21, снимает детали 22. После, согласно технологическому процессу, либо выполняется пункт 7, либо пункт снимается приспособление 23 и завершается операция.

4.1.3 Анализ и расчет вероятности отказа установки для ГДУ

Современные технические средства очень разнообразны и состоят из большого количества взаимодействующих механизмов, аппаратов и приборов. В таких сложных системах отказ всего одного ответственного элемента может привести к отказу или сбою в работе всей системы. Поэтому рекомендуется проводить анализ надежности системы, прогнозируя время безотказной работы, для контроля и предотвращения отказов.

При анализе причин возникновения отказа используется метод «дерево неисправностей», который наглядно показывает структуру взаимосвязей нарушений, полученных в результате наблюдения за работой установки в обратном порядке, для того чтобы отыскать возможные причины их возникновения.

В состав технической системы «Установка для ГДУ» входят механическая, электрическая, и гидравлическая подсистемы, а также система управления. Возможные причины отказа установки: функциональный отказ как следствие внезапного отказа блоков, узлов, деталей или параметрический отказ, который произойдет, когда будет исчерпана технологическая надежность. Функциональный отказ, приводящий к остановке установки, наступит в результате реализации приведенных прогнозируемых причинно-следственных цепей опасностей: отказ электродвигателя (4 шт.); отказ концевого выключателя (2 шт.); короткое замыкание кабеля на землю; короткое замыкание электрооборудования на корпус; отказ предохранителя (4 шт.); отказ насоса; отказ предохранительного клапана; отказ дросселя; потеря герметичности в маслопроводе; отказ зубчатого колеса (4 шт.); отказ центробежного вентилятора.

										Лист
										87
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

Система рассматривается в период нормальной эксплуатации, поэтому принимается, что параметрические отказы не происходят. На рисунке 4.5 представлено построенное на основе рассмотренных причинно-следственных цепей «дерево неисправностей» установки для ГДУ.

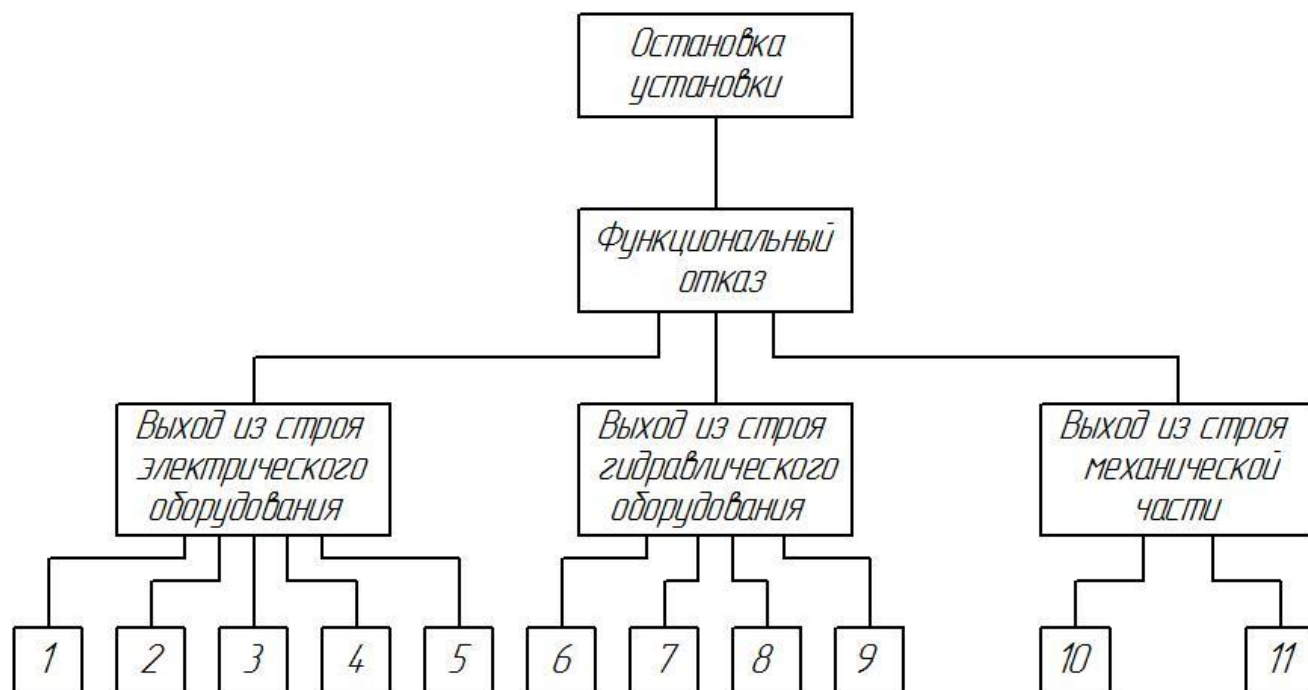


Рисунок 4.5 – «Дерево неисправностей» установки для ГДУ: 1 – отказ электродвигателя; 2 – отказ концевого выключателя кабеля; 3 – короткое замыкание кабеля на землю; 4 – короткое замыкание электрооборудования на корпус; 5 – отказ предохранителя; 6 – отказ насоса; 7 – отказ предохранительного клапана; 8 – отказ дросселя; 9 – потеря герметичности в маслопроводе; 10 – отказ зубчатого колеса; 11 – отказ центробежного вентилятора

Оценка возможности отказа или безотказной работы отдельных элементов технических систем производится на основе статистических данных по интенсивности их отказа.

Таблица 4.1 – Интенсивность отказов элементов

Позиция	Наименование отказа	Интенсивность отказов $\lambda, ч^{-1}$
1	Отказ электродвигателя	$3,1 \cdot 10^{-4}$
2	Отказ концевого выключателя	$3 \cdot 10^{-4}$
3	Короткое замыкание кабеля на землю	$3 \cdot 10^{-7}$
4	Короткое замыкание электрооборудования на корпус	$1,1 \cdot 10^{-5}$
5	Отказ предохранителя	$3 \cdot 10^{-7}$
6	Отказ насоса	$1,12 \cdot 10^{-6}$
7	Отказ предохранительного клапана	$1 \cdot 10^{-5}$
8	Отказ дросселя	$1 \cdot 10^{-8}$
9	Потеря герметичности в маслопроводе	$3 \cdot 10^{-6}$
10	Отказ зубчатого колеса	$2 \cdot 10^{-9}$
11	Отказ центробежного вентилятора	$1 \cdot 10^{-8}$

Вероятность безотказной работы элементов определяется по формуле:

$$P_i(t) = e^{-\lambda_i t} = \exp(-\lambda_i t), \quad t = 10000 \text{ часов.} \quad (4.1)$$

Вероятность отказа электрической подсистемы:

$$Q_{\text{Эл}} = 1 - P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5. \quad (4.2)$$

Вероятность отказа гидравлической подсистемы:

$$Q_{\text{Гидр}} = 1 - P_6 \cdot P_7 \cdot P_8 \cdot P_9. \quad (4.3)$$

Вероятность отказа механической подсистемы:

$$Q_{\text{Мех}} = 1 - P_{10} \cdot P_{11}. \quad (4.4)$$

Вероятность функционального отказа:

$$Q_{\Phi} = 1 - P_{\text{Эл}} \cdot P_{\text{Гидр}} \cdot P_{\text{Мех}}, \quad (4.5)$$

где

$$P_{\text{Эл}} = 1 - Q_{\text{Эл}};$$

$$P_{\text{Гидр}} = 1 - Q_{\text{Гидр}}; \quad (4.6)$$

$$P_{\text{Мех}} = 1 - Q_{\text{Мех}}.$$

Вероятность остановки установки:

$$Q = Q_{\Phi}. \quad (4.7)$$

Решение:

$$P_1 = e^{-3,1 \cdot 10^{-4} \cdot 10000} = 0,045;$$

$$P_2 = e^{-3 \cdot 10^{-4} \cdot 10000} = 0,049;$$

$$P_3 = e^{-3 \cdot 10^{-7} \cdot 10000} = 0,997;$$

$$P_4 = e^{-1,1 \cdot 10^{-5} \cdot 10000} = 0,895;$$

$$P_5 = e^{-3 \cdot 10^{-7} \cdot 10000} = 0,997;$$

$$P_6 = e^{-1,12 \cdot 10^{-6} \cdot 10000} = 0,988;$$

$$P_7 = e^{-1 \cdot 10^{-5} \cdot 10000} = 0,904;$$

$$P_8 = e^{-1 \cdot 10^{-8} \cdot 10000} = 0,999;$$

$$P_9 = e^{-3 \cdot 10^{-6} \cdot 10000} = 0,970;$$

$$P_{10} = e^{-2 \cdot 10^{-9} \cdot 10000} = 0,999;$$

$$P_{11} = e^{-1 \cdot 10^{-8} \cdot 10000} = 0,999.$$

Вероятности отказа и безотказной работы каждой из подсистем:

$$Q_{\text{Эл}} = 1 - 0,045 \cdot 0,049 \cdot 0,997 \cdot 0,895 \cdot 0,997 = 0,998;$$

$$Q_{\text{Гидр}} = 1 - 0,988 \cdot 0,904 \cdot 0,999 \cdot 0,970 = 0,134;$$

$$Q_{\text{Мех}} = 1 - 0,999 \cdot 0,999 = 0,001.$$

Вероятность функционального отказа:

$$Q_{\Phi} = 1 - 0,998 \cdot 0,134 \cdot 0,001 = 0,999.$$

Вероятность отказа установки равна: $Q = 0,999$.

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		90

По расчётам можно сделать вывод, что установка проработает 10000 часов без отказа с вероятностью 99%.

4.2 Разработка вероятностной модели

Из экспериментов [34, 35] известно, что у всех параметров упрочнения существует значительный разброс значений. В связи с этим, любая теория упрочнения должна включать в себя анализ разброса характеристик упрочнения. В общем можно выделить три группы, влияющие на разброс характеристика упрочнения:

- 1) погрешности, связанные с установкой, на которой производится упрочнение;
- 2) разброс свойств материала;
- 3) погрешности измерения остаточных напряжений.

Каждая из этих групп по-своему влияет на процесс и оценку технологических параметров упрочнения. Для детального анализа рассмотрим каждую из групп подробнее.

Погрешности, связанные с установкой, можно разбить на три составляющие:

- неравномерность расхода шариков;
- разброс кинетической энергии шариков;
- погрешность времени упрочнения.

Погрешности, связанные со свойствами материала, можно разделить на два типа:

- разброс модуля упругости;
- разброс предела текучести.

Погрешности измерения остаточных напряжений можно также разбить на две группы:

- погрешности измерительного инструмента;
- погрешности параметров образцов.

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		91

Предполагается, что поведение остаточных напряжений описывается функцией:

$$\sigma(Z) = F(q, K, t, E, \sigma_T, Z), \quad (4.8)$$

где q – расход шариков;

K – кинетическая энергия шарика;

t – время упрочнения;

E – модуль упругости;

σ_T – предел текучести.

Для того чтобы найти влияние всех этих параметров разброс остаточных напряжений, выражение (4.8) раскладывается согласно [36]:

$$\sigma(Z) = \frac{d\sigma(Z)}{dq} \Delta q + \frac{d\sigma(Z)}{dK} \Delta K + \frac{d\sigma(Z)}{dt} \Delta t + \frac{d\sigma(Z)}{dE} \Delta E + \frac{d\sigma(Z)}{d\sigma_T} \Delta \sigma_T, \quad (4.9)$$

где Δq – погрешность расчета расхода шариков;

ΔK – погрешность расчета кинетической энергии шарика;

Δt – погрешность измерения времени упрочнения;

σ_T – предел текучести материала;

$\Delta \sigma_T$ – погрешность расчета предела текучести.

Ниже рассматривается влияние этих параметров на остаточные напряжения.

4.2.1 Влияние расхода шариков на остаточные напряжения

Расход шариков существенно зависит от конструкции установки упрочнения, типа применяемого масла и других условий. Расход шариков, согласно работе [33] определяется следующими параметрами:

- μ – вязкость масла;
- T_M – температура масла;
- N – количество шариков, находящихся в установке;
- $P_{тр}$ – напор в транспортной магистрали;

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		92

- d_p – диаметр сопла;
- l – расстояние до детали;
- α – угол распыла шариков;
- P – давление в рабочей магистрали;
- $R_{ш}$ – радиус шариков.

В результате общая зависимость для расхода шариков будет иметь вид:

$$q = q(T_M, N, P_{тр}, d_p, l, \alpha, P, R_{ш}). \quad (4.10)$$

В результате раскладывая в ряд Тейлора [5], получим:

$$\begin{aligned} \Delta q = & \frac{dq}{dT_M} \Delta T_M + \frac{dq}{dN} \Delta N + \frac{dq}{dP_{тр}} \Delta P_{тр} + \frac{dq}{dd_p} \Delta d_p + \frac{dq}{dl} \Delta l + \frac{dq}{d\alpha} \Delta \alpha + \\ & + \frac{dq}{dP} \Delta P + \frac{dq}{dR_{ш}} \Delta R_{ш}. \end{aligned} \quad (4.11)$$

Расход шариков является чувствительным к количеству шариков в ёмкости перед соплом, до определенного предела [16], поэтому если количество шариков превышает критическую массу, то их влиянием можно пренебречь.

От давления в транспортной магистрали зависит количество шариков, доставляемых к соплам, однако расход от давления зависит аналогично количеству. После того как давление превысит критическую точку, расход шариков перестанет расти, это связано с ограниченными пропускными возможностями сопла. Поэтому если давление высоко, то им можно пренебречь.

От диаметра рабочего сопла зависит пропускная способность и расход, но оно не изменяется в процессе упрочнения, не учитывая разбивание, следовательно, им можно пренебречь. Диаметр шариков так же не меняется, им можно пренебречь, при условии, что износ очень мал.

Перепад давления в рабочей магистрали определяется точностью измерительного прибора и стабильностью работы насоса. Исходя из работы [13]

зависимость расхода шариков от рабочего давления будет иметь вид, как на рисунке 4.6.

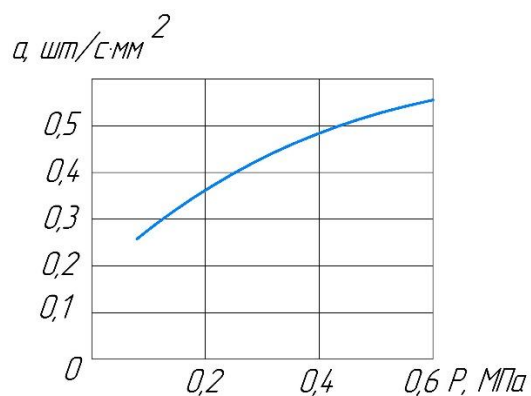


Рисунок 4.6 – Зависимость расхода шариков от рабочего давления

Влияние расстояния от сопла до рабочей части поверхности, согласно [15], можно оценить по рисунку 4.7

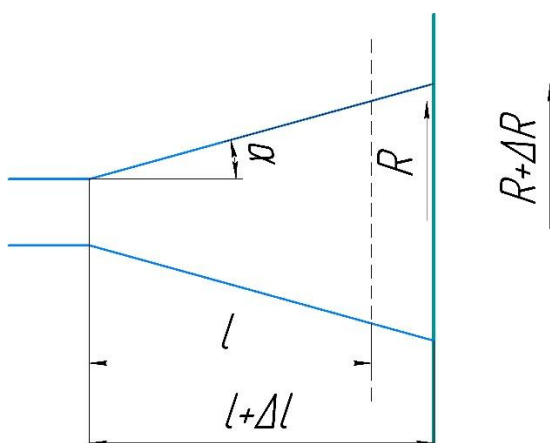


Рисунок 4.7 – Схема упрочнения

Расход шариков определяется по формуле:

$$q = \frac{Q}{S}, \quad (4.12)$$

где $S = \pi R^2$.

Радиус пятна распыла находится по формуле:

$$R = (d_p + 2l \sin \alpha) / 2. \quad (4.13)$$

С учётом (4.13) получим:

$$q = \frac{4Q}{\pi(d_p + 2l\sin\alpha)^2}. \quad (4.14)$$

Производная по l :

$$\frac{dq}{dl} = -\frac{16Q\sin\alpha}{\pi(d_p + 2l\sin\alpha)^3}. \quad (4.15)$$

Как видно из (4.15) чувствительность к l падает с увеличением расстояния до детали и ростом угла распыла

Влияние угла разброса на расход шариков, определяется аналогично:

$$\frac{dq}{d\alpha} = -\frac{16Ql\cos\alpha}{\pi(d_p + 2l\sin\alpha)^3}. \quad (4.16)$$

Колебание $\Delta\alpha$ зависит от точности определения пятна распыла. Реально при упрочнении пятно распыла не имеет четких очертаний, поэтому за его радиус принимается размер площадки, равномерно покрытый отпечатками:

$$\Delta\alpha \approx \frac{\Delta R}{l}, \quad (4.17)$$

где ΔR – погрешность измерения диаметра пятна распыла. Тогда:

$$q = K_q \Delta P q + \frac{16Ql\cos\alpha}{\pi(d_p + 2l\sin\alpha)^3} \cdot \frac{\Delta R}{l} + \frac{16Q\sin\alpha}{\pi(d_p + 2l\sin\alpha)^3} \Delta l. \quad (4.18)$$

Чувствительность остаточных напряжений к расходу шариков определяется, при условии, что расход не меняется:

$$\frac{d\sigma_{(z,t)}^{\Sigma \text{ост}}}{dq} = \frac{\sigma_{(z,t)}^{\Sigma \text{ост}}}{q}. \quad (4.19)$$

Тогда на основании (4.18), (4.19) суммарные напряжения рассчитываются:

$$\overline{\Delta\sigma_{(z,t,\Delta q)}^{\Sigma_{\text{ост}}}} = \frac{\overline{\sigma_{(z,t)}^{\Sigma_{\text{ост}}}}}{q} \left[K_q \Delta P q + \frac{16Q}{\pi(d_p + 2l\sin\alpha)^3} \left(\frac{\Delta R}{l} \cos\alpha + \Delta l \sin\alpha \right) \right]. \quad (4.20)$$

4.2.2 Влияние кинетической энергии шариков на разброс остаточных напряжений

Как показывают опыты [6] и численные расчеты [13], остаточные напряжения наиболее чувствительны к кинетической энергии упрочнения. Выразим кинетическую энергию:

$$K = K(d_p, V, R_{\text{ш}}). \quad (4.21)$$

где V – скорость полета шариков.

Раскладывая, в ряд Тейлора, получим:

$$\Delta K = \frac{dK}{dd_p} \Delta d_p + \frac{dK}{dV} \Delta V + \frac{dK}{dR_{\text{ш}}} \Delta R_{\text{ш}}. \quad (4.22)$$

Если рассчитывать в кинетическую энергию по формуле:

$$K = \frac{m_{\text{ш}} V^2}{2}, \quad (4.23)$$

где $m_{\text{ш}}$ – масса шарика, определяемая по формуле:

$$m_{\text{ш}} = \frac{4}{3} \pi R_{\text{ш}}^3 \rho, \quad (4.24)$$

где ρ – плотность шариков, то (4.22) примет вид:

$$\Delta K = m_{\text{ш}} V \Delta V + 2R_{\text{ш}}^2 \rho V^2 \Delta R_{\text{ш}}. \quad (4.25)$$

Скорость полета шариков зависит от температуры масла и давления в рабочей магистрали, поэтому можно записать:

$$\Delta V = K_T \Delta T + K_P \Delta P, \quad (4.26)$$

где ΔT – перепад температуры в процессе упрочнения;

K_T – коэффициент чувствительности скорости потока к температуре;

K_P – коэффициент чувствительности скорости потока к давлению.

Если в упрочнении участвуют калиброванные шарики, то $\Delta R_{ш} = 0$, но если присутствуют шарики с другим радиусом, то разброс:

$$\Delta R_{ш} = \frac{N_{п}}{N} (R_{п} - R_{ш}), \quad (4.27)$$

где $N_{п}$ – количество примесных шариков;

$R_{п}$ – радиус примесных шариков.

С учетом выражений (4.25), (4.26), (4.27) можно получить зависимость разброса остаточных напряжений:

$$\overline{\Delta \sigma_{(z,t,\Delta K)}^{\Sigma \text{ост}}} = \frac{d\overline{\sigma_{(z,t)}^{\Sigma \text{ост}}}}{dK} \left[m_{ш} V (K_T \Delta T + K_P \Delta P) + 2\pi R_{ш}^2 \rho V^2 \frac{N_{п}}{N} (R_{п} - R_{ш}) \right], \quad (4.28)$$

будем предполагать:

$$\frac{d\overline{\sigma_{(z,t)}^{\Sigma \text{ост}}}}{dK} / \overline{\sigma_{(z,t=1)}^{\Sigma \text{ост}}} = \frac{d\overline{\sigma_{(z,t=t_{упр})}^{\Sigma \text{ост}}}}{dK} / \overline{\sigma_{(z,t=t_{упр})}^{\Sigma \text{ост}}}, \quad (4.29)$$

тогда можно записать:

$$\overline{\Delta \sigma_{(z,\Delta K)}^{\Sigma \text{ост}}} = \alpha(z) \overline{\sigma_{(z,t_{упр})}^{\Sigma \text{ост}}} \left[m_{ш} V (K_T \Delta T + K_P \Delta P + 2\pi R_{ш}^2 \rho V^2 \frac{N_{п}}{N} |R_{п} - R_{ш}| \right], \quad (4.30)$$

где

$$\alpha(z) = \frac{d\overline{\sigma_{(z,t=1)}^{\Sigma \text{ост}}}}{dK} / \overline{\Delta \sigma_{(z,t=1)}^{\Sigma \text{ост}}}. \quad (4.31)$$

										Лист
										97
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	15.04.05.2018.582.00 ПЗ					

4.2.3 Влияние свойств материала на остаточные напряжения

Теоретически на формирование остаточных напряжений влияет большое число характеристик, как механических, так и физико-химических. В данном случае будет рассмотрено влияние модуля упругости и предела текучести. Первый характеризует упругие свойства материала, а второй пластические. Рассмотрим их поочередно. Разброс модуля упругости находится исходя из партии деталей:

$$\Delta \bar{E} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{E} - E_i), \quad (4.32)$$

где \bar{E} – математическое ожидание;

N - число упрочняемых деталей в партии.

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i. \quad (4.33)$$

Кроме того, необходимо учесть погрешность измерительных приборов и метода измерения. Если модуль упругости определяется по прогибу пластин, то имеем:

$$\Delta E_{\text{изм}} = \frac{BH^3 E^2 \Delta f}{3Gl^3}, \quad (4.34)$$

где B – ширина образца;

H – высота образца;

Δf – погрешность измерения прогиба пластин, зависит от погрешности измерительного прибора;

G – нагрузка на образец;

l – база измерений.

Аналогично пункту 4.2.2 вводим функцию распределения вида:

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		98

$$\beta(z) = \frac{d\overline{\sigma_{\Sigma_{ост}}^{(z,t=1)}}}{dE} / \overline{\Delta\sigma_{\Sigma_{ост}}^{(z,t=1)}}. \quad (4.35)$$

Тогда на основании (4.33), (4.34), (4.35) получим зависимость разброса остаточных напряжений от модуля упругости:

$$\overline{\Delta\sigma_{\Sigma_{ост}}^{(z,t)}} = \beta(z) \overline{\sigma_{\Sigma_{ост}}^{(z,t^{уп})}} \left[\Delta E_{изм} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\bar{E} - E_i| \right]. \quad (4.36)$$

Для учета разброса, связанного с пределом текучести, устанавливается связь между пределом текучести и микротвердостью материала [5]:

$$\sigma_T = A(HV)^\mu. \quad (4.37)$$

Таким образом, разброс предела текучести оценивается по разбросу микротвердости. Для этого вводится понятие средней микротвердости и среднего разброса значений:

$$\overline{HV} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (HV - HV_i), \quad (4.38)$$

$$\Delta\overline{HV} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\overline{HV} - HV_i), \quad (4.39)$$

где N – число измерений.

С учетом (4.38) и (4.39), приращение предела текучести будет иметь вид:

$$\sigma_T = A\mu(HV)^{\mu-1} \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\overline{HV} - HV_i|. \quad (4.40)$$

Для построения зависимости между микротвердостью материала и остаточными напряжениями вводится функция чувствительности:

$$\gamma(z) = \frac{d\overline{\sigma_{(z,t=1)}^{\Sigma_{\text{ост}}}}}{d\sigma_T} / \overline{\Delta\sigma_{(z,t=1)}^{\Sigma_{\text{ост}}}}. \quad (4.41)$$

Тогда на основании (4.40), (4.41) получим:

$$\overline{\Delta\sigma_{(z,t)}^{\Sigma_{\text{ост}}}} = \gamma(z) \overline{\sigma_{(z,t_{\text{тип}})}^{\Sigma_{\text{ост}}}} \left[A\mu(HV)^{\mu-1} \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\bar{H}V - HV_i| \right]. \quad (4.42)$$

4.2.4 Определение функции чувствительности

В пунктах 4.2.1 – 4.2.3 используются функции чувствительности $\alpha(z)$ и $\beta(z)$. Для их нахождения используются уравнения упрочнения (2.41), с учетом функций (4.31), (4.35), (4.41) находится интеграл:

$$\overline{\sigma_{(z,t=1)}^{\Sigma_{\text{ост}}}} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 q(F_r + F_\theta) dt. \quad (4.43)$$

Пусть обобщенная функция чувствительности по параметру – φ :

$$\varphi_\theta = \frac{d}{d\theta} \int_0^1 q(F_r + F_\theta) dt.$$

Тогда функции α , β , γ можно определить:

$$\begin{aligned} \alpha(z) &= \frac{\varphi_K}{\int_0^1 q(F_r + F_\theta) dt}; \\ \beta(z) &= \frac{\varphi_E}{\int_0^1 q(F_r + F_\theta) dt}; \\ \gamma(z) &= \frac{\varphi_{\sigma_T}}{\int_0^1 q(F_r + F_\theta) dt}. \end{aligned} \quad (4.44)$$

Получить эти функции можно только численными методами, на основе алгоритма, описанного в главе 3.

4.3 Алгоритм расчета погрешностей

Окончательно алгоритм расчета можно представить в следующем виде:

1) по формулам (4.20), (4.30), (4.36), (4.42) определяются погрешности, связанные с расходом шариков, кинетической энергией, модулем упругости, пределом текучести;

2) Из работы [10] определяется погрешность, связанная с методом измерения остаточных напряжений:

$$\Delta\sigma_i^{\text{изм}} = \frac{2 H_i^2 E}{3 ml} \frac{\Delta f_{\text{нрi}}}{\Delta a} \left(\frac{\Delta H}{2H_i} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta \tilde{f}}{f} + \frac{\Delta \tilde{a}}{a} \right), \quad (4.45)$$

где H – толщина образца;

m – длина упрочняемой зоны;

Δa – толщина снятого слоя;

ΔH – погрешность измерения толщины образца;

l – база измерения;

Δl – погрешность базы измерений;

$\Delta \tilde{f}$ – погрешность измерения приращения прогиба;

f – приращение прогиба;

$\Delta \tilde{a}$ – погрешность измерения толщины снятого слоя.

3) по формуле (4.9) определяется общая погрешность.

Выводы по разделу

1) Разработана установка для гидродробеструйного упрочнения, дано её описание и принцип, выполнен расчет безотказной работы устройства. Оформлена заявка на патент.

2) Разработана инструкция работы с установкой и представлена в виде блок-схемы.

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		101

3) Построен алгоритм расчета суммарной погрешности определения остаточных напряжений, с учетом влияния расхода шариков, кинетической энергии шариков, свойств материала.

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		102

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1 Разработана математическая модель формирования напряженного состояния поверхностных слоев обрабатываемых деталей при гидродробеструйной обработке, учитывающая законы теории упругопластического деформирования и теории приспособляемости. Анализ полученной математической модели показал, что она отражает в явном виде физическую связь режимов упрочнения и выходных параметров.

2 Численный анализ модели выявил следующие особенности распределения остаточных напряжений при ГДУ:

- форма эпюры остаточных напряжений практически не зависит от времени упрочнения;
- на поверхности упрочненной детали формируется тонкий слой остаточных растягивающих напряжений, что ранее было установлено только экспериментально;
- с увеличением рабочего давления и диаметра шариков растет как толщина слоя сжимающих напряжений, так и их величина;
- с уменьшением предела текучести материала обрабатываемой детали, толщина слоя с сжимающими остаточными напряжениями увеличивается, а пиковое значение сжимающих остаточных напряжений уменьшается.

3 Математическая модель устанавливает связь между временем упрочнения и остаточными напряжениями, что позволяет по заданному распределению остаточных напряжений назначить оптимальное время обработки элемента поверхности.

4 Разработана установка для гидродробеструйного упрочнения и инструкция по работе с ней.

5 Разработана вероятностная модель оценки чувствительности выходных технологических параметров к разбросу входных параметров процесса, что позволяет использовать математическую модель при проектировании операций ГДУ.

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		103

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Заявка 2018112206 Российская Федерация, МПК7 В 64 О 1/00. Установка для ГДУ / П.Г. Мазеин, Д.В. Беликов, В.С. Столяров. – № 019023; заявл. 04.04.2018. – 8 с.

2. Беликов, Д.В. Особенности определения погрешностей расчета остаточных напряжений при гидродробеструйном упрочнении и наладка установки для ста гидродробеструйного упрочнения / Д.В. Беликов, П.Г. Мазеин// Сборник Наука Урала, сдана в редакцию в марте 2018.

3. Беликов, Д.В. Надежность установок для ГДУ / Д.В. Беликов, П.Г. Мазеин// Сборник Прогрессивные технологии в машиностроении, сдана в редакцию в апреле 2018.

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		104

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петросов, В.В. Гидродробеструйное упрочнение деталей и инструментов / В.В. Петросов. – М.: Машиностроение, 1977. – 166 с.
2. Одинг, И.А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов / И.А. Одинг. – М.: Машгиз.1972. – 260 с.
3. Трощенко, В.Т. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении / В.Т. Трощенко, В.В. Покровский, А.В. Прокопенко. – М.: Металлургия. 1989. – 256 с.
4. Бирдегулов, Л.Р. Исследования трещиностойкости металлов / Л.Р. Бирдегулов, А.М. Щипачев. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2016. – С. 28–32.
5. Павлов, П.А. Основы инженерных расчетов элементов машин на усталостную и длительную прочность / П.А. Павлов. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отд-ие, 1988. – 252 с.
6. Серенсен, С.В. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность / С.В. Серенсен, В.П. Когаев, Р.М. Шнейдерович. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
7. Павлов, В. Ф. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочненных образцов с концентраторами напряжений учеб. пособие / В.Ф. Павлов, В. А. Кирпичев, В. С. Вакулюк. – Самара, 2011. – 1 эл. опт. диск (CD-R).
8. Гарашук, Г.Н. Основы расчета деталей машин на прочность: учебное пособие / Г.Н. Гарашук, В.А. Литвинова. – Томск.: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2013. – 92 с.
9. Любарский, И.М. Металлофизика трения / И.М. Любарский, Л.С. Палатник. – М.: Металлургия. 1976. – 176 с.
10. Трофимов, В.В. Об изменении напряжений в упрочненных приповерхностных слоях изделий при усталости / В.В. Трофимов, Е.Н. Радеев. – Проблемы прочности – 1999. – № 7 – С. 30-33.

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		105

11. Фридман, Я.Б. Механические свойства металлов: / Я.Б. Фридман. – М.: Машиностроение. 1974. – 472 с.

12. Руднецкий, Н.М. К оценке влияния остаточных напряжений и упрочнения поверхностного слоя на усталостную прочность / Н.М. Руднецкий // Проблемы прочности – 1991. – №10 – С. 27-34.

13. Кастерин, А.В. Расчетное определение остаточных напряжений при гидродробеструйном упрочнении /А.В. Кастерин. – Челябинск: ЧГТУ, 1991. – 41 с.

14. Кастерин, А.В. Расчетное определение остаточных напряжений при гидродробеструйной обработке // Интесификация производства и повышение качества изделий поверхностным пластическим деформированием / А.В. Кастерин, П.Г. Мазеин // Тезисы докл. науч. – техн. конф. – Тольятти: ВАЗ. 1989, - 76 с.

15. Саверин, М.М. Дробеструйный наклеп / М.М. Саверин. – М.: Машгиз. 1955. – 290 с.

16. Школьник, Л.М. Повышение прочности шестерен дробеструйным наклепом / Л.М. Школьник, В.П. Девяткин // Вестник машиностроения – 1950. – №12 – С.17-21.

17. Рыковский, Б.П. Местное упрочнение деталей поверхностным наклепом / Б.П.Рыковский, В.А.Смирнов. – М.: Машиностроение, 1985. – 152 с.

18. Кудрявцев, И.В. Современное состояние и основные направления в области упрочнения деталей машин поверхностным наклепом / И.В.Кудрявцев. – М.: Машгиз. 1958. – 43 с.

19. Куликов, О.О. Исследование эффективности поверхностных методов упрочнения для деталей, подвергающихся циклическому кручению / О.О. Куликов // Новые исследования в области машиностроительных материалов – 1952. – № 49 – С. 118-143.

20. Генкин, М.Д. Повышение надежности тяжело нагруженных зубчатых передач / М.Д. Генкин. – М.: Машиностроение, 1979. – 144 с.

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		106

21. Горицкий, В.М. Структура и усталостное разрушение металлов / В.М. Горицкий. – М.: Металлургия, 1980. – 208 с.

22. Джонсон, К.Л. Механика контактного взаимодействия / К.Л. Джносон. – М.: Мир, 1989. – 510 с.

23. Москвитин, В.В. Пластичность при переменных нагрузениях / В.В. Москвитин. – М.: Изд. Московского университета, 1965. – 256 с.

24. Волков, И.А. Моделирование циклического упругопластического деформирования конструкционных сталей при сложном нагружении / И.А. Волков, И.Ю. Гордлеева, И.С. Тарасов // Вестник научно-технического развития – 2008. – №6 – С. 26-39.

25. Dumas, G. Elasto-plastic indentation of half space by a long rigid cylinder / G. Dumas, C. Baronet // Internat. J. Mech. Sci. – 1971. – №13 – P. 199-205.

26. Lee, C.H. Analisis of boll indentation / C.H. Lee, K. Scabski. – Prace Naukowe Machanika, Warsaw Polithechnic. – 1972. – №9 – P. 217-228.

27. Демидов, С.Г. Теория упругости / С.Г. Демидов. – М.: Высш. Школа, 1979. – 432 с.

28. Кузнецов, Е.А. Перемещения и деформации в упругом полупространстве при давлении на него сферического штампа / Е.А. Кузнецов, Л.И. Бондаренко, В.П. Горшунов // Проблемы трения и изнашивания. – 1971. – № 31 –С. 3-14.

29. Биргер, И.А. Расчет на прочность деталей машин / И.А. Биргер, В.Ф. Шор, Г.Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1979. – 144 с.

30. Писаренко, Г.С. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести / Г.С. Писаренко, И.С. Можаровский. – М.: Наука, 1978. – 534 с.

31. Дель, Г.Д. Метод делительных сеток / Г.Д. Дель, Н.А. Новиков. – М.: Машиностроение, 1979. – 144 с.

32. Мазеин, П.Г. Прогнозирование полей напряжения в деталях методом конечных элементов П.Г Мазеин, А.В. Кастерин // Математическое обеспечение

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		107

систем с машинной графикой / Тех. докл. Науч. Техн. Семинара – Ижевск-Тюмень: ИДТ, 1990, – С. 91-92.

33. Игнатъев, А.Г. Использование упругопластического вдавливания сферического индентора для определения остаточных напряжений / А.Г. Игнатъев. – Челябинск. 1989. – С. 40-42.

34. Лупкин, Б.В. Технология упрочнения поверхностным пластическим деформированием материала / Б.В. Лупкин, А.И. Лагутин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – №27 – С. 32-38.

35. Синчурин, Д.В. Анализ методов повышения эксплуатационной надежности / Д.В. Синчурин // Научный журнал «Новый университет». – 2011. – №4. – С. 30-33.

36. Касаткин, А.С. Оценка точности определения остаточных напряжений при ППД /А.С. Касаткин. – М.: Машгиз. 1989. – 75 с.

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		108

ПРИЛОЖЕНИЕ А. УСТАНОВКА ДЛЯ ГДУ



Рисунок А.1 – Установка для ГДУ (вид спереди)



Рисунок А.2 – Установка для ГДУ (вид сбоку)

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.05.2018.582.00 ПЗ

Лист

109



Рисунок А.3 – Установка для ГДУ (рабочая область)

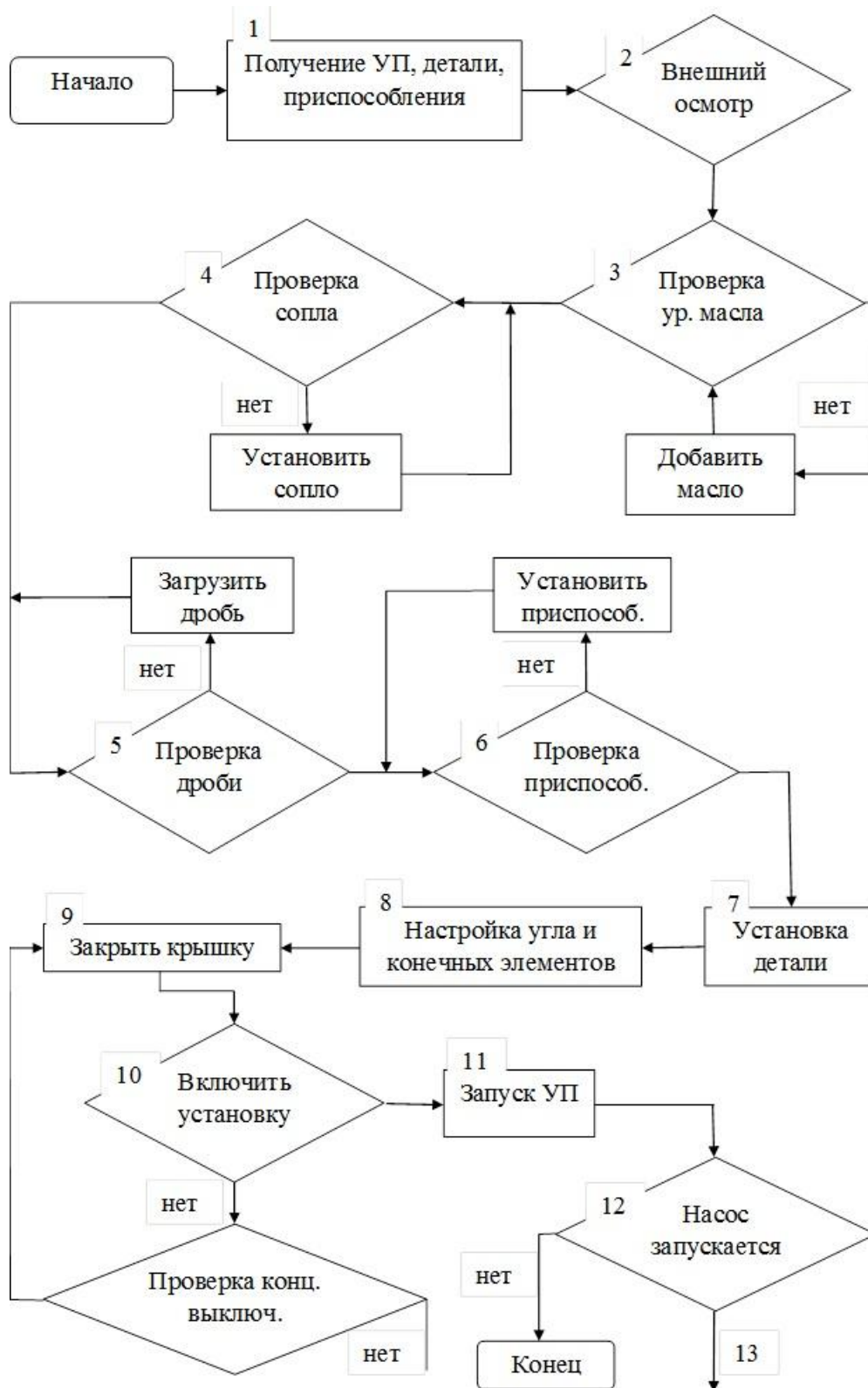


Рисунок А.4 – Установка для ГДУ (силовой аппарат)

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.05.2018.582.00 ПЗ

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. БЛОК СХЕМА НАЛАДКИ И ЗАПУСКА УСТАНОВКИ



Риунок Б.1 – Блок схема наладки и запуска установки для гидродробеструйного упрочнения

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

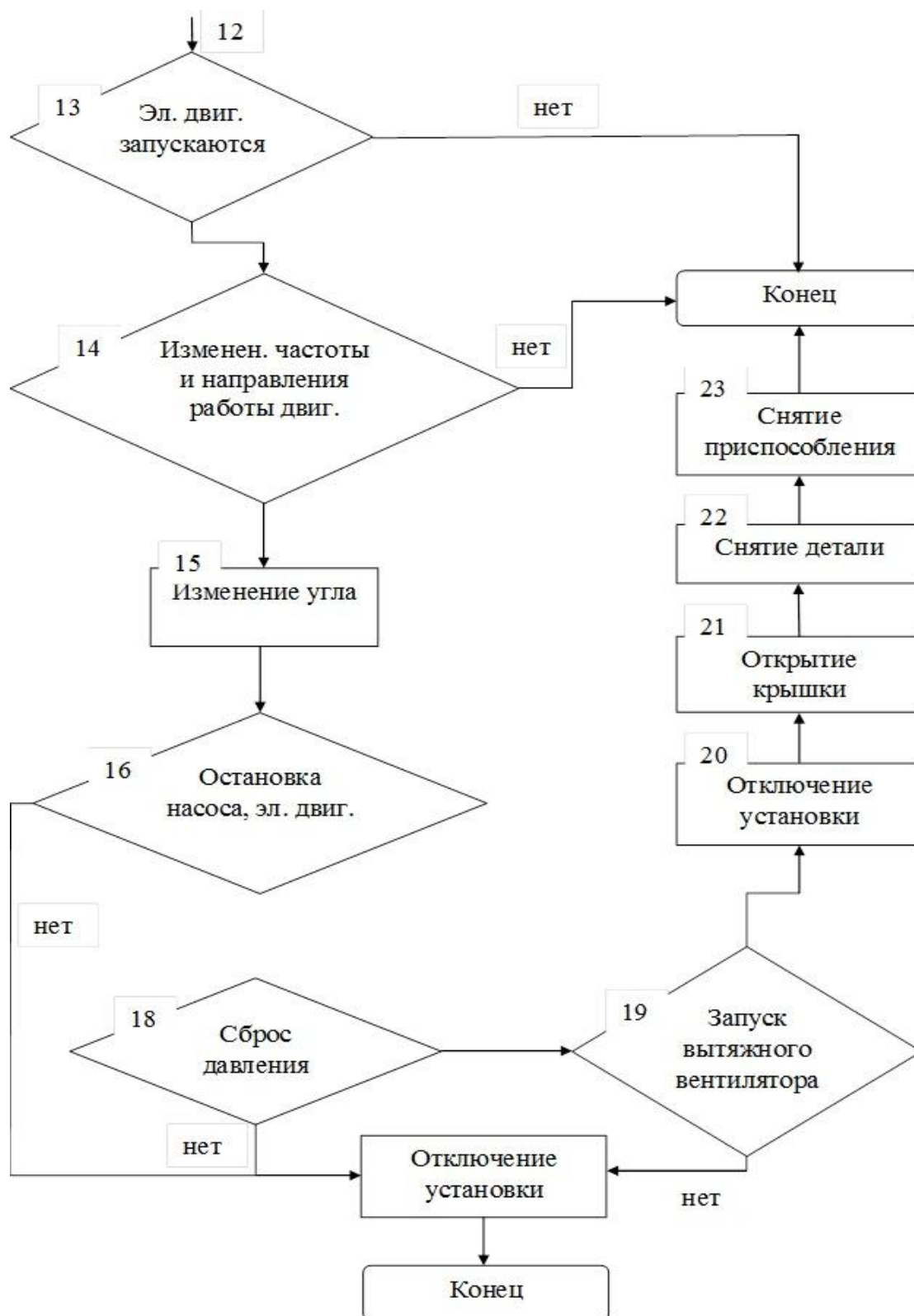


Рисунок Б.1 (продолжение) – Блок схема наладки и запуска установки для гидродробеструйного упрочнения

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ПРИЛОЖЕНИЕ В

УВЕДОМЛЕНИЕ О РЕГИСТРАЦИИ ЗАЯВКИ НА ПАТЕНТ

Форма № 94 ИЗ, ПМ, ПО-2016

**Федеральная служба по интеллектуальной собственности
Федеральное государственное бюджетное учреждение**

**«Федеральный институт промышленной собственности»
(ФИПС)**

Бережковская наб., 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП-5, 125993

Телефон (8-499) 240-60-15 Факс (8-495) 531-63-18

УВЕДОМЛЕНИЕ О ПРИЕМЕ И РЕГИСТРАЦИИ ЗАЯВКИ

04.04.2018	019023	2018112206
<i>Дата поступления</i>	<i>Входящий №</i>	<i>Регистрационный №</i>

<p>ДАТА ПОСТУПЛЕНИЯ (при приеме) оригиналов документов заявки 04 АПР 2018</p> <p>ФИПС 019023</p> <p><input type="checkbox"/> (86) <small>(регистрационный номер международной заявки и дата международной подачи, установленные публикацией)</small></p> <p><input type="checkbox"/> (87) <small>(номер и дата международной публикации международной заявки)</small></p> <p style="text-align: center;">ЗАЯВЛЕНИЕ о выдаче патента Российской Федерации на полезную модель</p> <p>(54) НАЗВАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ Установка для гидродробеузного упрочнения</p> <p>(71) ЗАЯВИТЕЛЬ (фамилия, имя, отчество (последнее - при наличии) физического лица или наименование юридического лица (без указания наименования документа), место жительства или место нахождения, включая страны и коды по модели)</p> <p>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» Россия, 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, д. 76</p> <p><input type="checkbox"/> полезная модель создана за счет средств федерального бюджета</p> <p>Заявитель является <input type="checkbox"/> государственным заказчиком <input type="checkbox"/> муниципальным заказчиком, исполнитель работ: _____ <small>(укажите наименование)</small></p> <p><input type="checkbox"/> исполнителем работ по _____ заказчик работ _____ <small>(укажите наименование)</small></p> <p>Контракт от _____ № _____</p> <p>(74) ПРЕДСТАВИТЕЛЬ(И) ЗАЯВИТЕЛЯ Указывается (не более трех) наименование (наименования) заявителя(заявителей) для выдачи деп по полученному патенту от (от/им) имени в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам</p> <p>Фамилия, имя, отчество (последнее - при наличии)</p> <p>Адрес Срок представительства <small>(без и пометки прилагается доверенность представителя заявителя, срок действия не указывается)</small></p>	<p>(21) РЕГИСТРАЦИОННЫЙ №</p> <p>ВХОДЯЩИЙ №</p> <p>(85) ДАТА ПЕРЕВОДА международной заявки на национальную фазу</p> <p>АДРЕС ДЛЯ ПЕРЕПИСКИ <small>(почтовый адрес, фамилия и инициалы или наименование адресата)</small></p> <p>Россия, 454080, Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, д. 76, ЮУрГУ, патентный отдел</p> <p>АДРЕС ДЛЯ СЕКРЕТНОЙ ПЕРЕПИСКИ: тот же</p> <p>Телефон: (351) 267-90-46 Факс: (351) 265-59-50 E-mail: melnichukov@sinpi.ru</p> <p>В Федеральную службу по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам Бережковская наб., 30, корп.1, Москва, Г-59, ГСП-5, 125993</p> <p>ИДЕНТИФИКАТОРЫ ЗАЯВИТЕЛЯ</p> <p>ОГРН 1027403857568 КПП 745301001 ИНН 7453019764</p> <p>СНИЛС - ДОКУМЕНТ(СЕРИЯ, НОМЕР) -</p> <p>КОД СТРАНЫ RU</p>
---	--

ОТД 17
06 АПР 2018
240 60 15

Федт

Общее количество документов в листах	30	Лицо, зарегистрировавшее документы
Из них - количество листов комплекта изображений изделия (для промышленного образца)	0	Сергеева Н.Н.
Количество платежных документов	1	

Сведения о состоянии делопроизводства по заявкам размещаются на сайте ФИПС по адресу «www.fips.ru» в разделе «Информационные ресурсы / Открытые реестры»

*9.1688
23.04.18 fdf
Мазани П. П. и др.*

Рисунок В.1 – Уведомление о приёме и регистрации заявки на патент