

Министерство образования и науки Грузии
Государственный университет Акакия Церетели

На правах рукописи

БУЛЕКБАЕВА ГУЛЬМИРА ЖАЙБЕРГЕНОВНА

ПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ
НАПЛАВЛЕННОГО СЛОЯ НА ПЛОСКОЙ
ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ

04.08 – инженерия и технология механики

Диссертация на соискание академической
степени доктора инженерии

Научные руководители:

доктор технических наук, профессор О.Г.Киквидзе
кандидат технических наук, профессор П.Н.Кипиани

Кутаиси - 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

	С.
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	9
1.1 Технология наплавки.....	9
1.1.1 Термомеханическая обработка.....	15
1.1.2 Виды термомеханической обработки.....	17
1.2 Особенности сварки и наплавки высокопрочных сталей	25
1.2.1 Пути предупреждения образования дефектов типа холодных трещин.....	30
1.2.2 Пути предупреждения образования дефектов типа горячих трещин.....	33
1.2.3 Материалы, применяемые при наплавке.....	37
1.3 Модели расчета пластического деформирования наплавленного слоя.....	40
1.4 Постановка задач исследования.....	44
2 ОБКАТКА НАПЛАВЛЕННОГО СЛОЯ НА ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ. ОДНОМЕРНАЯ ЗАДАЧА.....	47
2.1 Уравнение состояния материалов при повышенных температурах.....	47
2.2 Пластическое деформирование наплавленного слоя. Постановка одномерной задачи.....	50
2.3 Напряженно-деформированное состояние слоя и силовые параметры технологического процесса.....	53
2.4 Представление основных уравнений в безразмерной форме.....	56
2.5 Численное решение одномерной задачи в системе Mathcad и анализ результатов	57
3 ПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ НАПЛАВЛЕННОГО СЛОЯ НА ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ. ДВУМЕРНАЯ ЗАДАЧА	62
3.1 Постановка двумерной задачи.....	62
3.2 Численное решение дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных разностей.....	65
3.3 Построение разностной схемы.....	67
3.4 Сходимость, аппроксимация, устойчивость разностной схемы.....	71

4	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННОГО НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА.....	74
4.1	Методика исследования.....	74
4.2	Технология наплавки, экспериментальный стенд и измерительные приборы ...	76
4.3	Изготовление образцов для пластической деформации.....	79
4.4	Результаты экспериментального исследования пластически деформированного наплавленного металла	80
	ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ.....	88
	ЛИТЕРАТУРА.....	90
	ПРИЛОЖЕНИЕ.....	96

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей задачей машиностроительного производства является повышение надежности и долговечности изделий. Решение этих вопросов прямо зависит от создания и освоения прогрессивных ресурсосберегающих технологических методов улучшения качества деталей и повышения их износостойкости, снижения себестоимости, увеличения производительности, повышения долговечности и улучшения условий труда.

Путем наплавки получают изделия с износостойкими, жаростойкими, антифрикционными, кислотоупорными, и тому подобными свойствами.

Если в машиностроительном производстве наплавку применяют для повышения износостойкости трущихся поверхностей, т.к. она позволяет значительно увеличить срок службы деталей и сократить расходы дефицитных материалов на их изготовление, то в ремонтном производстве - в основном для проведения последующих работ по восстановлению расположения, формы и размеров изношенных элементов.

При восстановлении (ремонте) деталей наплавку выполняют тем же или близким по составу металлом, из которого изготовлено изделие. Если при наплавке однородных металлов процесс получения качественного соединения между наплавленным и основным металлом не вызывает затруднений, то при наплавке материалов, значительно отличающихся по химическому составу от материала основы, задача получения качественного соединения значительно осложняется и может перерасти в проблему.

Наплавляемый металл выбирают с учетом эксплуатационных требований и свариваемости. При наплавке поверхностных слоев с заданными свойствами, как правило, химический состав наплавленного металла существенно отличается от химического состава основного металла. Поэтому при наплавке должен выполняться ряд технологических требований.

Таким требованием является, прежде всего, минимальное разбавление наплавленного слоя основным металлом, расплавленным при наложении валиков. Поэтому в процессе наплавки необходимо получение наплавленного слоя с минимальным проплавлением основного металла, так как в противном случае возрастает доля основного металла в формировании наплавленного слоя. Для уменьшения доли основного металла в наплавленном слое наплавку следует проводить с небольшим шагом.

Анализ современных методов наплавки показывает, что для наплавленного металла характерны ряд факторов, которые в комплексе приводят к значительному снижению

износостойкости нанесённого металлопокрытия деталей: значительный разброс механических свойств; наличие включений и металлургических дефектов; неоднородность структуры и неравномерность поверхностной твёрдости по длине детали; наличие неблагоприятных растягивающих напряжений; снижение усталостной прочности наплавленных деталей; трудность механической обработки.

Повышение качества металлопокрытия и износостойкости восстановленных деталей является важной задачей на ремонтных предприятиях машиностроения. Повышение износостойкости деталей позволяет, в известной мере, разрешить задачу повышения долговечности машин.

Одним из этапов технологического процесса наплавки является поверхностное пластическое деформирование. Поверхностное пластическое деформирование (ППД) – это вид упрочняющей обработки, при котором не образуется стружка, а происходит пластическое деформирование тонкого поверхностного слоя заготовки, распространённый и эффективный способ повышения несущей способности металлических деталей машин. Применение ППД позволяет эффективно влиять на повышение долговечности деталей, работающих в условиях циклических нагрузок, трения и воздействия коррозионных сред и имеющих концентраторы напряжений.

Отделочная обработка методами пластического деформирования сопровождается упрочнением поверхностного слоя, что очень важно для повышения надежности работы деталей. В процессе деформации у металлов создается форма изделия и обеспечиваются определенные свойства. Это требует знания влияния температуры, скорости и способа деформации на изменение физических свойств.

Все примеры, рассмотренные в разных литературных источниках, приводят к заключению, что структура и свойства вещества после деформации существенно отличаются от его структуры и свойств до деформации.

Опыт и теория показывает, что получить наиболее высокие свойства материала с данным химическим составом, можно только соединив анализ реологического поведения материала с глубоким изучением структурных изменений, вызываемых пластической деформацией.

Поверхностное пластическое деформирование обеспечивает изменение структуры металла, но без его полной рекристаллизации. Важной характеристикой состояния поверхностного слоя являются остаточные напряжения.

Наплавка металлического слоя проводится при повышенных температурах. Для того, чтобы улучшить структуру наплавленного слоя, снизить остаточные напряжения необходимо дальнейшее пластическое деформирование наплавленного слоя, которое

сопровождается взаимодействием сложных процессов термического и механического характера. Следовательно, имеет место термомеханическая обработка.

Термомеханическая обработка (ТМО) металлов и сплавов - совокупность операций деформации, нагрева, охлаждения, в результате которых формирование окончательной структуры и свойств материала происходит в условиях повышенной плотности и оптимального распределения несовершенств строения, созданных пластической деформацией.

Таким образом, актуальность темы обусловлена с одной стороны, практической значимостью и перспективностью широкого применения ППД роликами горячего наплавленного металла деталей, а с другой стороны, недостаточным объёмом научной информации о возможностях влияния ППД роликами на металлопокрытия деталей, способах производства для рационального и эффективного использования на практике при ремонте.

В качестве объекта исследования выбрано металлопокрытие, наносимое на поверхность детали автоматической электродуговой наплавкой проволоками под слоем флюса с упрочняющей обработкой обкатными роликами при использовании тепла сварочной дуги.

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, общих выводов и приложения.

В первом разделе рассматривается технология наплавки, материалы применяемые при наплавке, термомеханическая обработка поверхностей, а также рассмотрены модели пластического деформирования материала при повышенных температурах абсолютно жестким инструментом.

Принципиальная возможность исследования процессов формоизменения реономных тел показана в работах А.А.Ильюшина, А.Ю.Ишлинского и Г.Генки. Состояние материала при повышенных температурах необходимо описать на основе реологических моделей.

Реологические модели для исследования технологических задач пластического формоизменения металлов использованы в трудах Г.Генки, А.А.Ильюшина, А.Ю.Ишлинского, Н.Н.Малинина, К.И.Романова, О.Зенковича, Н.Кристеску, С.Танга, Д.Дурбана и др.

В трудах Н.Н.Малинина и его сотрудников [45,47,58] расчеты технологических процессов обработки металлов основаны на уравнениях состояния, отражающих реономные свойства металлов - на уравнениях технических теорий ползучести.

На основе выполненного анализа сформулирована цель и поставлены задачи, решение которых обеспечивает достижение цели исследования.

Для того, чтобы определить параметры технологического процесса: давление на контактной поверхности, крутящий момент, подобрать геометрические размеры, скорость перемещения деформирующего ролика в зависимости от геометрических размеров наплавленного слоя, параметров материала необходимо исследовать напряженно-деформированное состояние в очаге деформации с учетом реальных реологических свойств материала.

В технологических задачах горячего формоизменения металлов уравнение состояния материала следует брать на основе теории ползучести [43,45,56]. Из простейших теории ползучести наиболее приемлемым является теория упрочнения, которая хорошо описывает ползучесть сталей и сплавов в широком интервале температур.

Во втором разделе рассмотрен расчет слоя при наплавке плоских поверхностей на основе гипотезы плоских сечений. Решение одномерной задачи записано в аналитическом виде, где входят интегралы от нелинейной функции.

Поэтому, для того чтобы провести конкретные вычисления для разных значений постоянных материалов, целесообразно использовать численные алгоритмы. Составлена прикладная программа в математическом редакторе Mathcad и проведены численные расчеты. Результаты расчетов показаны на графиках.

Таким образом, в одномерной постановке получены сравнительно общие формулы для расчета напряженно-деформированного состояния граничного слоя, давления и сил трения на поверхности контакта, усилий и момента, действующих на ролик.

Третий раздел посвящен двумерной задаче расчета наплавленного слоя. Записано дифференциальное равновесие частных производных для нелинейно-вязкого материала.

Нелинейное дифференциальное уравнение в частных производных решается численным методом конечных разностей.

Четвертый раздел посвящен экспериментальному исследованию, рассмотрены методы и методики проведения экспериментальных исследований, описывается объект исследования, приведены технические характеристики применяемых установок и оборудования для проведения экспериментальных исследований.

В заключении приводятся общие выводы и научные результаты работы.

Научная новизна работы определяется следующими результатами:

- Изучена одномерная задача исследования напряженно-деформированного состояния наплавленного слоя при обкатке цилиндрическим роликом на основе теории ползучести – теории упрочнения;

- Разработана прикладная программа в математическом редакторе Mathcad для численного анализа;
- Численными расчетами определены напряжения в очаге деформации, давление на контактной поверхности, Усилия и крутящий момент действующие на ролик;
- Сформулирована двумерная задача. Получена замкнутая система нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных и записаны граничные условия;
- Приведены основные положения для численного решения нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных разностей. Дифференциальные уравнения и граничные условия записаны в конечных разностях для узлов сетки;
- Основные результаты экспериментального исследования:
 - количество и размеры трещин наплавленного металла зависят от доля участия основного металла в наплавленном и от химического состава металла.
 - оптимальная температура нагрева для посленаплавочной пластической деформации находятся в интервале $650-700^{\circ}\text{C}$, что дает возможность устранить дефекты сварного соединения и наплавленного металла. Увеличивается прочность (износостойкость) наплавленного металла.
 - вероятность устранения трещин в наплавленном металле в процессе пластического деформирования зависят от площади наплавленного металла, вида обработки и снижается с понижением температуры.
- Разработанная методика расчета наплавленного слоя, может быть использована для определения параметров технологического процесса при восстановлении плоских поверхностей.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Технология наплавки

Наплавка - это процесс нанесения при помощи сварки слоя металла на поверхность изделия. Наплавку применяют при изготовлении новых и восстановлении изношенных деталей. Наплавка в ремонтном деле эффективна благодаря тому, что восстановленная деталь часто в несколько раз дешевле новой детали и при правильно выбранной технологии восстановления не уступает ей по работоспособности.

Наплавка может быть осуществлена многими способами. Наиболее широко для этой цели применяют различные виды и приемы дуговой сварки.

На рис.1.1 показана классификация методов наплавки. Каждый вид наплавки имеет свои особенности, область применения, которые обеспечивают эффективность процессов восстановления деталей.

Поэтому, способы наплавки делят на группы в зависимости от видов применяемых источников тепла, характера легирования и способа защиты формируемого покрытия от влияния кислорода и азота воздуха.

Широкое распространение получил способ электродуговой наплавки.

Электродуговая наплавка имеет много видов. При их классификации учитывают следующие классификационные признаки:

- уровень механизации (ручная, полуавтоматическая, автоматическая);
- вид применяемого тока (постоянный, переменный, импульсный, специальной характеристики);
- вид электрода (плавящийся, неплавящийся);
- полярность электрода при постоянном токе (прямая, обратная);
- вид дуги (прямая, косвенная);
- режим (стационарный, нестационарный);
- способ защиты зоны наплавки от воздушной атмосферы (в среде защитных газов, водяных паров, жидкости, под слоем флюса, комбинированный);
- способ легирования наплавляемого металла (покрытием электрода, флюсом, электродным материалом, комбинированный).

Перспективным является способ автоматической наплавки под слоем флюса, разработанный в Институте электросварки им. Е.О.Патона (применимость 47% от общего объема наплавочных работ по восстановлению изношенных деталей на ремонтных предприятиях).

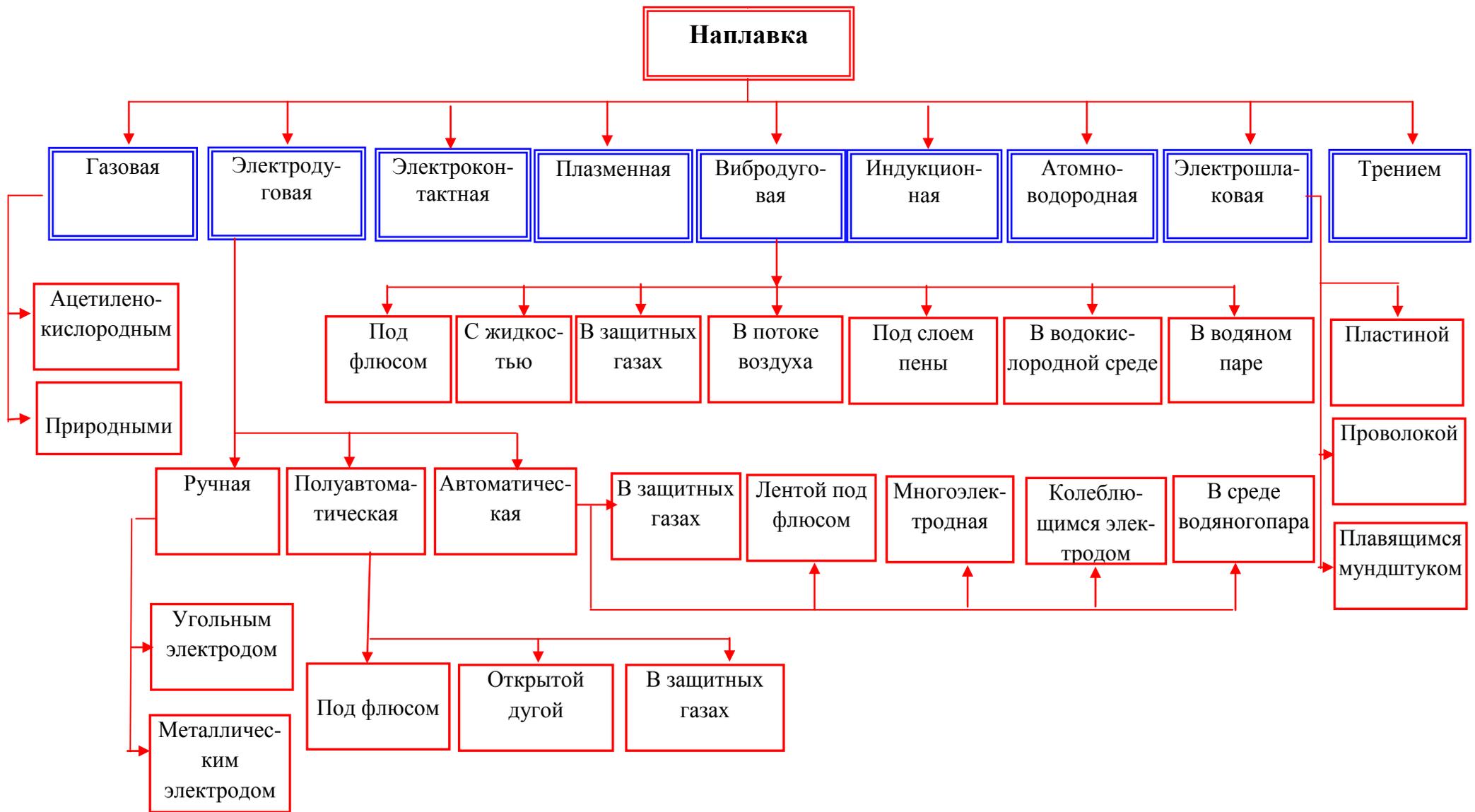


Рис.1.1 Классификация методов наплавки

Также широко распространены вибродуговая наплавка и наплавка в среде защитных газов. Проведём анализ существующих методов наплавки. Показатели рассматриваемых методов наплавки представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 Техничко-экономические показатели методов наплавки

Метод наплавки	Производительность метода (толщина покрытия до 1 мм)		Толщина наносимого слоя, мм	Припуск на механическую обработку, мм	Доля основного металла в наплавленном, %	Прочность сцепления, МПа	Деформация детали после наплавки	Минимальный диаметр детали, мм	Снижение сопротивления усталости, %	Коэффициент производительности (толщина покрытия до 1 мм)	Коэффициент технико-экономической эффективности
	кг/ч	см ² /мин									
Под флюсом	2...15	16...24	0,8...10	0,8...1,5	27...60	650	Значит.	45	1 5	1,62...1,45	0,436
Вибродуговая	0,5...4	8...22	0,3...3	0,7...1,3	8...20	500	Незнач.	10	35	0,85...0,72	0,2 5
В среде CO ₂	1,5...4,5	18...36	0,5...3,5	0,7...1,3	12...45	550	Значит.	15	1 5	1,82...1,77	0,403
Электроконтактная	1,0...2,8	50...90	0,2...1,5	0,2...0, 5	12...35	300	Незнач.	15	25	2,3...2,1	0,66
Порошковыми проволоками	2...9	16...36	1...8	0,6...1,2	5...30	600	Значит.	20	1 5	1,75...1,54	0, 4
Газовая	0,15...2	1...3	0,4...3,5	0,4...0,8	5...30	480	Значит.	-12	25	0,73...0,58	0,138
Плазменная	1...12	45...72	0,2...5,0	0,4...0,9	20...40	490	Незнач.	-12	1 2	2,2...1,9	0,56
Ручная	0,4...4,0	8...14	0,5...4,0	1,1...1,7	6...25	50 0	Значит.	45	6 0	1, 0	0,314
Аргонно-дуговая	0,3...3,6	12...26	0,2...2,5	0,4...0,9	27...60	450	Незнач.	10	2 5	2,1...1,7	0,17 1

При наплавке под флюсом дуга горит между электродом и изделием, к которому подведен ток, и образует на поверхности изделия ванночку расплавленного металла. В зону дуги подаётся флюс, который частично расплавляется и образует плотную шлаковую корку. Расплавленный шлак надежно изолирует жидкий металл от газов воздуха, а также защищает наплавленный металл от вредного воздействия окружающей среды. Наплавку под флюсом применяют при восстановлении деталей, износ которых составляет больше 1...2 мм. В зависимости от режимов наплавки можно получить слой металла почти любого химического состава толщиной 0,5 мм и более [67].

Физико-механические свойства наплавленного металла при автоматической наплавке под флюсом в значительной степени зависят от выбора электродной проволоки, флюса и режимов наплавки [12,17,36,46,48,54]. Оценивая автоматическую наплавку под слоем флюса, следует отметить следующие её достоинства:

- высокую производительность процесса благодаря увеличению плотности тока и коэффициента наплавки;

- более высокое и стабильное качество покрытия вследствие хорошей защиты дуги от окружающей среды и устойчивости процесса в связи с его автоматизацией;
- возможность получения наплавленного слоя большой толщины (более 5 мм);
- уменьшение потерь электродного металла на разбрызгивание и выгорание;
- возможность получения наплавленного металла с высокими физико-механическими свойствами в результате его легирования;
- облегчение условий работы сварщика и более низкие требования к его квалификации.

Вместе с тем, этому способу наплавки присущи следующие недостатки:

- значительный нагрев детали;
- сложность наплавки деталей диаметром менее 40 мм из-за стекания наплавленного металла и трудности удержания флюса на поверхности детали;
- ограниченность применения для наплавки деталей сложной конструкции;
- трудоемкость удаления шлаковой корки [12,17,36,46,48,54].

Наплавка в защитных газах предпочтительнее в тех случаях, когда невозможна или затруднена наплавка под флюсом. В качестве защитных газов используются инертные (аргон и гелий) и активные газы (углекислый газ, азот и др.), а также водяной пар или смеси инертных и активных газов. Наибольшее применение на практике нашли сварочный углекислый газ и аргон высшего и первого сортов. Их поставляют и хранят в стальных баллонах: углекислый газ в сжиженном состоянии под давлением 7 МПа, а аргон в сжатом газообразном состоянии под давлением 15 МПа. Наилучшую защиту обеспечивают инертные газы, однако они существенно дороже и применяются в обоснованных случаях [12,17,36,46,48,54].

Наплавку в среде защитных газов применяют для восстановления цилиндрических деталей диаметром 10...30 мм.

Толщина наплавленного слоя составляет 0,8...1 мм. Для наплавки используют кремнемарганцовистую, легированную сплошную или порошковую проволоку.

По скорости плавления проволоки наплавка в среде углекислого газа не уступает наплавке под флюсом и имеет следующие преимущества: меньший нагрев детали; возможность наплавки деталей небольшого диаметра (до 10 мм); отсутствие трудоёмкой операции по отделению шлаковой корки; возможность наблюдения и корректировки процесса образования наплавочного слоя; дешевизна углекислого газа и оборудования. К числу недостатков этого способа следует отнести следующие: низкая производительность (потери на угар и разбрызгивание достигают 5...15%); наличие большой доли основного металла в наплавленном слое; налипание брызг на мундштук горелки и на наплавляемую

поверхность детали; снижение усталостной прочности на 10...15%; необходимость защиты сварщиков от излучения дуги; менее гладкая поверхность наплавленного слоя.

Автоматическая вибродуговая наплавка является разновидностью электродуговой наплавки и отличается от нее в основном тем, что электрическая дуга горит не постоянно, а периодически. Это обеспечивается сообщением концу электродной проволоки колебательного движения, вызывающего замыкание и разрыв питающей дугу электрической цепи. Во время короткого замыкания цепи через контакт электродной проволоки с наплавляемой деталью проходит ток плотностью более 600 А/мм^2 , благодаря чему в месте контакта создается высокая температура, вызывающая оплавление конца проволоки. Под действием вибратора проволока разрывается, и часть ее в виде капли остается на наплавляемой поверхности. Образующаяся после разрыва проволоки электрическая дуга расплавляет оставшийся на детали металл, обеспечивая его прочное сцепление с материалом детали. Таким образом, нагрев и расплавление металла происходят за счет тепла периодически создаваемых коротких замыканий электрической дуги.

Вибродуговая наплавка имеет ряд существенных преимуществ перед другими способами восстановления деталей [12,17,36,46,48,54]:

- незначительный нагрев, что позволяет наплавлять тонкие детали;
- возможность закалки наплавленного металла в процессе его нанесения, что исключает необходимость в последующей термической обработке деталей;
- небольшая зона термического влияния, в результате чего химический состав и физико-химические свойства материала детали почти не изменяются;
- высокая производительность процесса;
- минимальная деформация детали, что позволяет уменьшить толщину наплавленного слоя для создания необходимого припуска под дальнейшую ее обработку.

Основным недостатком вибродуговой наплавки в жидкости является снижение на 40-45% усталостной прочности наплавленных деталей, что объясняется возникновением в поверхностном слое остаточных напряжений растяжения и микротрещин вследствие резкого охлаждения водой нагретого металла. Кроме того, имеет место неравномерность твердости наплавленного слоя, а высокая скорость затвердевания расплавленного металла создает условия для образования пор. Усталостная прочность деталей повышается при вибродуговой наплавке в среде защитных газов, при этом наплавленный слой в зависимости от марки электродной проволоки имеет твердость HB 160-450. Наилучшее качество вибродуговой наплавки обеспечивается при применении флюса.

В ремонтном производстве кроме электродуговой сварки широко применяется также газовая сварка, с помощью которой выполняется до 20% сварочных работ. Она наиболее эффективна в следующих случаях:

- при ремонте деталей из сплавов цветных металлов;
- при ремонте чугуновых деталей, требующих последующей механической обработки, поскольку сварной шов при газовой сварке имеет лучшую обрабатываемость резанием по сравнению с электросварным швом;
- при сварке деталей толщиной менее 2 мм, когда сложно избежать прожога деталей и обеспечить качественную электродуговую сварку;
- при наплавке или напайке твердых сплавов;
- при резке металлов.

Горючий газ должен удовлетворять следующим требованиям: высокая температура пламени при сгорании; высокая скорость горения; высокая теплота сгорания. Газопламенным способом можно наплавить слой толщиной до 3мм.

Этот способ обеспечивает следующие достоинства: незначительное пролавление основного металла; возможность наплавки мелких деталей сложной формы; уменьшение опасности возникновения трещин, поскольку процесс наплавки включает предварительный подогрев и последующее замедленное охлаждение изделия; низкая стоимость оборудования для наплавки [68].

Вместе с тем для газовой наплавки характерны и недостатки: низкая производительность при наплавке массивных деталей, требующих продолжительного предварительного подогрева; необходимость высокой квалификации сварщика.

На основании проведённого анализа для восстановления изношенных деталей выбираем автоматическую электродуговую наплавку под слоем флюса.

Идея сварки под флюсом принадлежит Н.Г.Славянову. Способ автоматической наплавки и сварки под слоем флюса в том виде, в каком он в настоящее время применяется, разработан в Институте электросварки АН Украины имени академика Е.О.Патона.

Применение данного способа восстановления обеспечивает: высокую производительность процесса за счёт применения больших плотностей тока; экономичность процесса в отношении расхода электроэнергии и расходных материалов; возможность получения слоя металла большой толщины; хорошее формирование наплавленного металла; равномерность слоя и небольшие припуски на последующую механическую обработку; возможность введения около 30% легирующих элементов и

получения слоя металла почти любого химического состава; независимость качества наплавленного металла от квалификации исполнителя; высокий коэффициент наплавки.

1.1.1 Термомеханическая обработка

Поверхностное пластическое деформирование – один из наиболее простых и эффективных технологических путей повышения работоспособности и надежности деталей машин.

В результате пластических деформаций изменяется не только форма и размеры, но и структура и свойства исходного металла. Причем изменение структуры и свойств происходит в благоприятную сторону: повышаются механические характеристики (повышается прочность и твердость, увеличиваются пределы текучести и упругости), уменьшаются показатели пластичности (относительное удлинение и сужение, ударная вязкость).

Поверхностное пластическое деформирование обеспечивает изменение структуры металла, но без его полной рекристаллизации. Важной характеристикой состояния поверхностного слоя являются остаточные напряжения.

При поверхностном пластическом деформировании вследствие изменения структуры материала поверхностного слоя создаются полезные сжимающие остаточные напряжения. В ходе обработки форма зерен (кристаллитов) поверхностных слоев металлической заготовки изменяется. Они вытягиваются в направлении деформации, образуется упорядоченная структура волокнистого характера. Детали, обработанные поверхностным пластическим деформированием, становятся менее чувствительными к усталостному разрушению.

Согласно классификации и особенностям применения поверхностного пластического деформирования, в соответствии с ГОСТ18296-72 «Обработка поверхностным пластическим деформированием. Термины и определения», все методы поверхностного пластического деформирования подразделяют на статические и ударные. При статических методах обработки инструмент воздействует на обрабатываемую поверхность с определенной постоянной силой P , происходит плавное перемещение очага воздействия, который последовательно проходит всю поверхность, подлежащую обработке. При этом инерционные силы не оказывают существенного влияния на

поверхностное пластическое деформирование. К таким методам относят различные выглаживания, обкатывания и раскатывания [49,51].

К прогрессивным методам упрочнения металлов и сплавов относится термомеханическая обработка. Термомеханическая обработка металлов и сплавов - совокупность операций деформации, нагрева, охлаждения, в результате которых формирование окончательной структуры и свойств материала происходит в условиях повышенной плотности и оптимального распределения несовершенств строения, созданных пластической деформацией. ТМО - один из комбинированных технологических процессов упрочняющей обработки, сопровождающейся изменением строения и свойств материалов. Механизм и кинетика структурных изменений при ТМО зависят от структуры исходного металла или сплава.

Повышение прочности в сочетании с достаточной пластичностью металлов и сплавов позволяют уменьшить массу, а следовательно и стоимость сооружений и машин при их эксплуатации и во многих случаях при изготовлении. Поэтому непрерывно стремятся улучшить механические характеристики металла как в состоянии поставки, так и при последующей обработке. Известно, что пластическое деформирование и термическая обработка меняют свойства металлов. Объединение этих операций, максимальное их сближение и создание единого процесса термомеханической обработки обеспечивают заметное повышение механических характеристик, что позволяет экономить до 15...40% металла и более или увеличить долговечность изделий. Длительное время пластическую обработку рассматривали в основном как операцию формирования, хотя известно, что 10...20% энергии, затрачиваемой на деформацию, идет на увеличение внутренней энергии дефектов кристаллической решетки. Перед окончательной термической обработкой от этой накопленной энергии освобождались и только после этого выполняли термические операции, приводившие металл к метастабильному состоянию с высокой прочностью и вязкостью. Между тем совмещение пластической деформации и фазовых (структурных) превращений или их сочетание в определенной последовательности вызывает повышение плотности дислокации, изменяет наличие вакансий и дефектов упаковки и может быть использовано для создания оптимальной структуры металла и формирования важнейших свойств — прочности и вязкости. Это совмещение пластической деформации и термического воздействия, целью которого является формирование требуемой структуры обрабатываемого тела, называют термомеханической обработкой (ТМО). При ТМО оба процесса - пластическая деформация и термическая обработка - могут совмещаться в одной технологической операции, но могут проводиться с разрывом по времени. Однако фазовые превращения

при этом должны выполняться в условиях повышенной плотности дефектов решетки, возникающих благодаря пластической деформации металла. В условиях ТМО сочетание пластической и термической обработок для разных материалов определяется исходным структурным состоянием, чувствительностью к этим воздействиям и последствиям воздействия.

1.1.2 Виды термомеханической обработки

Термомеханическую обработку классифицируют по последовательности проведения пластического деформирования и условиям термической обработки (например, низкотемпературная и высокотемпературная термомеханическая обработка). При высокотемпературной термомеханической обработке сталь нагревают до температуры аустенитного состояния (выше температуры рекристаллизации), и осуществляют деформацию, что ведет к наклепу аустенита, а затем подвергают закалке с отпуском. В результате устраняется развитие отпускной хрупкости стали и повышается ее ударная вязкость при комнатной температуре, понижается температурный порог хладоломкости, повышается сопротивление хрупкому разрушению, уменьшается чувствительность к трещинообразованию при термической обработке. Такую обработку используют для углеродистых, легированных, конструкционных, пружинных, инструментальных сталей. Также используется вариант высокотемпературной термомеханической обработки диффузионным (перлитным) способом, когда сталь после аустенитизации подстуживают до температуры перлитного превращения и деформируют во время этого превращения.

При низкотемпературной термомеханической обработке сталь нагревают до аустенитного состояния, выдерживают при высокой температуре, охлаждают до уровня выше температуры начала мартенситного превращения, но ниже температуры рекристаллизации, при которой осуществляют обработку давлением и закалку. Также проводят низкотемпературную термомеханическую обработку с деформацией переохлажденного аустенита при температуре бейнитного превращения. Низкотемпературная термомеханическая обработка не снижает склонности стали к отпускной хрупкости и требует высоких степеней деформации, ее применяют к среднеуглеродистым легированным сталям, закаливаемым на мартенсит, имеющим вторичную стабильность аустенита. Для осуществления низкотемпературной термомеханической обработки требуется мощное оборудование для деформации, что ограничивает ее промышленное использование.

Поверхностное пластическое деформирование широко используется для повышения долговечности деталей машин и элементов конструкций.

Все существующие и перспективные методы технологического упрочнения поверхностным пластическим деформированием в соответствии с ГОСТ18296-72 подразделяются на статические и динамические (ударные).

При статических методах упрочнения инструмент, рабочие тела или среда воздействуют на обрабатываемую поверхность с определённой постоянной силой P , происходит плавное перемещение очагов воздействия, которые последовательно проходят всю поверхность, подлежащую обработке. При динамических методах инструмент, рабочие тела или среда многократно воздействуют на всю поверхность или на её часть. При этом сила воздействия P в каждом цикле изменяется от нуля или от некоторого значения P_1 до максимума [49,51].

При статических методах обработки инструмент воздействует на обрабатываемую поверхность с определенной постоянной силой P , происходит плавное перемещение очага воздействия, который последовательно проходит всю поверхность, подлежащую обработке. При этом инерционные силы не оказывают существенного влияния на поверхностное пластическое деформирование. К таким методам относят различные выглаживания, обкатывания и раскатывания.

При ударных методах инструмент многократно воздействует на всю обрабатываемую поверхность или ее часть, при этом сила воздействия P в каждом цикле изменяется от нуля или от некоторого минимального значения до максимума, а в случае локального ударного воздействия очаг деформирования может последовательно и равномерно проходить всю обрабатываемую поверхность, как и в статических методах.

Комплексными методами термомеханической обработки наплавленных поверхностей является:

- термомеханическая обработка проковкой и обкаткой;
- термомеханическая обработка обкаткой и виброобкаткой;
- термомеханическая обработка проковкой и виброобкаткой;
- термомеханическая обработка проковкой, обкаткой и виброобкаткой [24].

При этом различают:

- накатывание – поверхностное пластическое деформирование при качении инструмента по поверхности деформируемого материала. Различают частные случаи накатывания – обкатывание и раскатывание. Поверхностное обкатывание – это накатывание по выпуклой или плоской поверхности деформируемого материала.

Поверхностное раскатывание – это накатывание по вогнутой поверхности деформируемого материала;

- выглаживание – поверхностное пластическое деформирование при скольжении инструмента по локально контактирующей с ним поверхности деформируемого материала;

- калибрующее накатывание (калибровка) – накатывание, при котором происходит калибрование;

- дорнование – поверхностное пластическое деформирование при поступательном скольжении инструмента (дорна или деформирующей протяжки) по охватывающей его поверхности.

Обычно в качестве инструментов при поверхностном пластическом деформировании применяют шарики, ролики, выглаживатели (гладилки), дорны, деформирующие протяжки. При этом, применяя статические методы поверхностного пластического деформирования, получают меньшую толщину деформированного слоя со всеми вытекающими последствиями. Однако эти методы, как правило, обеспечивают меньшую шероховатость поверхностей с благоприятной формой микронеровностей.

Упрочнение стальных деталей методами поверхностного пластического деформирования применяется сравнительно давно. Сначала полагали, что упрочнению можно подвергать лишь стали невысокой твердости, поскольку они обладают наибольшей пластичностью.

ТМО наплавленных поверхностей осуществляется деформирующими инструментами, поэтому виды ТМО соответствуют применённым инструментам и комбинациям. Инструментами являются виброударник - зубило для обработки поверхностей проковкой, ролик - для деформирования поверхности обкаткой и виброролик или комплект вибророликов - для деформирования поверхности вибрацией. Все эти процессы выполняются в вязком состоянии металла с применением защитных газов.

Во всех случаях ТМО характерным определяющим фактором является контактное расстояние, т.е. расстояние от конечной точки наплавочной ванны до очага деформации, точный выбор которого обуславливает поддержку оптимальной температуры в зоне деформации.

Обкатывание и раскатывание поверхностей являются наиболее широко применяемыми способами поверхностного пластического деформирования деталей машин. Обкатыванием и раскатыванием отделяют и упрочняют цилиндрические, конические, плоские, фасонные наружные и внутренние поверхности. В качестве

станочного оборудования обычно применяются станки токарной группы, строгальные или специальные станки. В качестве рабочих элементов инструмента применяют шарики и ролики. При этом в зависимости от решаемой задачи инструмент может быть оснащен одним рабочим элементом или несколькими [49,51,52].

На рис.1.2 в качестве рабочих элементов накатника, применены ролики, на рис.1.3 – шарик. Для раскатывания внутренней цилиндрической поверхности по схеме в) применен один ролик, а по схеме г) - два ролика.

Шарики чаще изготавливают из подшипниковой стали, реже – из других высокопрочных материалов, например, из твердого сплава. Размеры шариков, их точность и другие требования, предъявляемые к ним, стандартизованы.

Шарики изготавливают номинальными диаметрами от 0,25 до 150 мм. Шарик с требуемым усилием поджимают к обрабатываемой поверхности. Поджим шарика осуществляется с помощью пружины или с помощью пневматического или гидравлического силового механизма.

На рис.1.3 представлена простейшая схема обкатывания. Она состоит в следующем: к вращающейся цилиндрической заготовке подводят инструмент, на котором закреплен закаленный гладкий шарик.

В процессе обработки заготовка вращается, а инструмент имеет продольную подачу. Благодаря самоустанавливаемости шарика во время обкатывания обеспечивается его свободное вращение при трении качения между шариком и обрабатываемой поверхностью заготовки. В силу этого и создаются более благоприятные условия для пластического деформирования, обеспечивающие получение менее шероховатой поверхности при небольшом давлении со стороны шара. С увеличением диаметра шарика глубина залегания остаточных напряжений возрастает, но градиент и абсолютные значения уменьшаются.

Для обкатывания и раскатывания также используются ролики различной конфигурации. Ролики бывают двух видов – стержневые и кольцевые, а их, в свою очередь, подразделяют на 15 типов, причем некоторые типы имеют по несколько исполнений. Стержневые ролики следует выполнять диаметром не более 18 мм, кольцевые - диаметром не более 160 мм. Чаще ролики изготавливают из подшипниковой стали, то есть используют ролики от стандартных подшипников.

Обкатывание и раскатывание роликами наиболее целесообразно проводить за один рабочий ход, максимум – за 2-3. Больше число проходов недопустимо, так как может привести к перенаклепу поверхности и ее отслаиванию.

Применение роликов для обкатки ограничивается, главным образом, случаями, когда требуется получить более глубокий упрочненный слой. Но процесс обкатывания и раскатывания роликами дороже, так как часто требует применения специальных роликов, а конструкция инструмента более сложная.

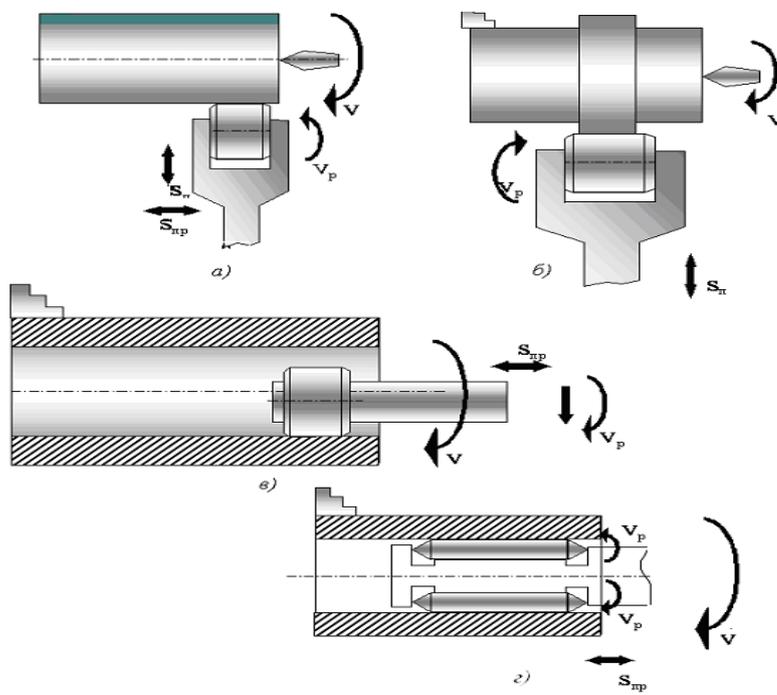


Рис. 1.2 Наружное обкатывание и раскатывание внутренней цилиндрической поверхности

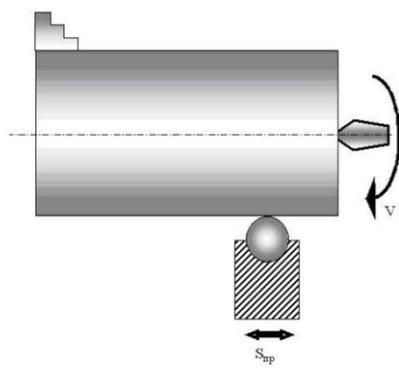


Рис. 1.3 Обкатывание одним шариком

Калибрующее обкатывание и раскатывание роликами и шариками применяют в случае необходимости повышения точности обрабатываемой поверхности, при этом не требуется повышения качества и значительного упрочнения поверхности (качество

поверхности лишь немного повышается за счет смятия микронеровностей). Для этого применяют многороликовые или многошариковые инструменты. Инструменты имеют жесткую конструкцию, в которой положение роликов или шариков обеспечивает необходимый небольшой натяг при обработке, благодаря чему и обеспечивается повышение точности формы и размера обрабатываемой поверхности.

Алмазное выглаживание применяется для поверхностного упрочнения и достижения малой шероховатости обработанной поверхности заготовки.

Алмазное выглаживание наружных, внутренних и фасонных поверхностей аналогично обработке роликами и шариками. Но при алмазном выглаживании обработка поверхностным пластическим деформированием проводится в условиях трения скольжения (с весьма малым коэффициентом трения, т.к. алмаз имеет очень малый коэффициент трения в паре с любым металлом), а при накатывании роликами и шариками – в условиях трения качения.

Алмазным выглаживанием можно обрабатывать почти все применяемые в промышленности металлы и сплавы, за исключением титана, циркония и ниобия, т.к. они налипают на рабочую часть инструмента.

При выглаживании поверхности обрабатываемой заготовки инструмент (алмаз или композит, смонтированный в державке) прижимается с определенной силой к обрабатываемой поверхности. Для изготовления выглаживателей одинаково широко применяются природные и синтетические алмазы, а также композиты. Стойкость природных и искусственных алмазов, композитов примерно одинакова. Для обработки железоуглеродистых сплавов более предпочтительным является применение в качестве деформирующих элементов композитов.

Учитывая повышенную хрупкость алмаза или композита, не следует обрабатывать выглаживанием прерывистые поверхности. Из-за нестабильности качества при обработке выглаживанием нельзя обрабатывать заготовки со значительными отклонениями формы в поперечном сечении или с неравномерной твердостью поверхности (разброс значений твердости не более 4 HRC). Поэтому предварительная обработка поверхности заготовки под алмазное выглаживание должна выполняться шлифованием, тонким точением или растачиванием, то есть точность размеров должна быть не ниже 7 квалитета с параметром шероховатости $Ra \leq 0,80$ мкм. Алмазное выглаживание проводится копирующим инструментом, поэтому отклонения формы в продольном и поперечном сечениях обрабатываемой заготовки изменяются незначительно (только за счет смятия микронеровностей). А это, как свидетельствует производственный опыт, обычно изменяет

размер обрабатываемой поверхности примерно от 10 до 15 мкм. То есть точность обработки может несколько снизиться.

Уступая по производительности накатке роликами и шариками, алмазное выглаживание обладает целым рядом преимуществ: благодаря высокой твёрдости и износостойкости алмаза даёт возможность обрабатывать практически все металлы (все виды сталей, бронзы, латуни, сплавы алюминия и т.д.); весьма малая высота неровностей вследствие низкой шероховатости и адгезионной способности кристалла; небольшие давления на инструмент, а следовательно, возможность упрочнения маложёстких деталей; возможность обрабатывать наружные, внутренние цилиндрические, плоские и фасонные поверхности.

Оценивая накатку роликами, можно выделить следующие её достоинства: высокая производительность при обработке поверхностей 7...10-го класса шероховатости; универсальность приспособлений процесса, т.е. возможность обработки деталей различной формы на металлорежущих станках всех типов; высокая стойкость и надёжность роликов; возможность широкого изменения параметров ролика и режимов упрочнения; высокий технико-экономический эффект повышения усталостной прочности, износостойкости, контактной выносливости и долговечности деталей; не требуется последующая доводка и полировка; возможность автоматизации и программирования [8,49,51,52,71].

Вместе с тем способу присущи некоторые недостатки: проскальзывание ролика по поверхности деталей, что вызывает дополнительный расход энергии, перенаклёп и нарушение поверхностного слоя; низкий класс получаемой шероховатости поверхности [49,51].

Отделочно-упрочняющая обработка деталей машин способом накатки шариками находит широкое применение в различных отраслях машиностроения. Применяется при обработке маложёстких и неравножёстких деталей, специальных или сложных профильных поверхностей. Сущность процесса накатки шариками аналогичен процессу накатки роликами. Особенности процесса являются использование стандартных шаров закалённых до HRC 60...65) с высокой точностью обработки и качеством поверхности; отсутствие материальной оси вращения шаров и самоустанавливаемость их относительно обрабатываемой поверхности под действием сил трения и обкатывания; отсутствие или незначительность проскальзывания шаров; возможность работы с меньшими давлениями и получения более низкой шероховатости. Недостатком является низкая производительность процесса по сравнению с накаткой роликами [49,51,52].

Калибрование отверстий методом поверхностного пластического деформирования при поступательном скольжении инструмента по охватывающей его поверхности деформируемого материала осуществляют в основном для повышения точности отверстий и качества их поверхностей. При калибровании жесткий инструмент (шарик, дорн или деформирующая протяжка) с натягом перемещаются в отверстия заготовки. Размеры поперечного сечения инструмента несколько больше размеров поперечного сечения отверстия для обеспечения натяга. Калибруют, обычно, сквозные отверстия с прямолинейной осью. Но при применении для калибрования одного шарика или дорна с одним деформирующим элементом возможно калибрование глухих отверстий, правда, при этом останется необработанным пояс у дна отверстия. Калибровать шариком в некоторых случаях возможно отверстия с криволинейной осью, но в этом случае применяется гибкая тяга.

Калибрование с помощью шарика или шариков является наиболее дешевым процессом. Процесс легко поддается автоматизации, однако размерная стойкость шариков низкая. Дорны и деформирующие протяжки – дорогие инструменты, имеющие высокую стойкость, и поэтому применяются в основном в крупносерийном и массовом производстве.

Калибрование подразделяют на поверхностное и объемное. При поверхностном калибровании с помощью шарика или дорна деформируется только поверхностный слой.

Вибронакатывание и вибровыглаживание применяют для повышения износостойкости деталей машин на поверхностях трения. В случае, если деформирующий элемент инструмента - шарик, то процесс называют вибронакатыванием, т.к. процесс происходит в условиях трения качения. Если деформирующий элемент алмаз, то процесс называют вибровыглаживанием, в этом случае процесс происходит в условиях трения скольжения. При вибронакатывании и вибровыглаживании на поверхностях трения деталей машин выдавливают слабозаметные, прилегающие друг к другу канавки. В канавках скапливаются смазочный материал и мелкие частицы, образующиеся в процессе износа.

Вибронакатывание применяется в основном для обработки нетвердых материалов, например, металлов в состоянии поставки или нормализованных.

Вибровыглаживание также можно применять для обработки мягких материалов. Но детали из металлов высокой твердости (до 65 HRC) обрабатываются только вибровыглаживанием.

Проанализировав все методы ППД поверхностного слоя деталей и принимая во внимание требования, предъявляемые к установке: дешевизна инструмента и расходных

материалов; возможность изготовления и ремонта установки на предприятии; простота обслуживания; высокая производительность; возможность работы на стандартном оборудовании; возможность передачи восстановленной детали после токарной обработки на сборку (минуя закалку), а также принимая во внимание сложившуюся сложную обстановку на ремонтных предприятиях выбираем упрочняющую технологию использующую накатку наплавленного металла самоцентрирующимися накатными роликами.

1.2 Особенности сварки и наплавки высокопрочных сталей

При восстановлении (ремонте) деталей наплавку выполняют тем же или близким по составу металлом, из которого изготовлено изделие. Если при наплавке однородных металлов процесс получения качественного соединения между наплавленным и основным металлом не вызывает затруднений, то при наплавке материалов, значительно отличающихся по химическому составу от материала основы, задача получения качественного соединения значительно осложняется и может перерасти в проблему.

При наплавке одной из важных характеристик стали является ее свариваемость, что особенно важно при использовании высокопрочных сталей.

Свариваемость не является неотъемлемым свойством металла или сплава, подобно физическим свойствам. Кроме технологических характеристик основного металла свариваемость определяется способом и режимом сварки, составом дополнительного металла, флюса, покрытия или защитного газа, конструкцией сварного узла и условиями эксплуатации изделия. В свою очередь это связано с повышением содержания углерода и легирующих элементов, которые вызывают специфические трудности при сварке этих сталей. Они заключаются в предупреждении возникновения холодных трещин, как в шве, так и в околошовной зоне, предупреждении возникновения кристаллизационных трещин в металле шва и обеспечении равнопрочности сварного соединения и основного металла.

Из вышесказанного следует, что при выборе высокопрочных, высокоуглеродистых сталей для изготовления конкретных конструкций большое значение имеет состав сварного шва, т.е., подбор сварочных материалов.

Основной трудностью при наплавке высокопрочных, высокоуглеродистых сталей, является появление холодных трещин в шве и околошовной зоне [41,57,63,73].

Согласно закалочной гипотезе, в околошовной зоне сварного соединения закаливающихся сталей во время охлаждения ниже 200°С образуется мартенситная структура и сложное напряженное состояние, которое обусловлено сварочными и структурными напряжениями [41,57,63,73].

Чем больше содержание углерода в шве, тем больше вероятность образования холодных трещин в связи с понижением температуры мартенситного превращения аустенита. Чем ниже температура мартенситного превращения, тем больше тетрагональность мартенсита и вероятность образования холодных трещин [16].

Все меры предупреждения возникновения холодных трещин осложняют технологию сварки, удороживают процесс изготовления сварных конструкций.

Следующая особенность сварки высокопрочных сталей – опасность возникновения горячих трещин, которая в большой степени зависит от содержания углерода и легирующих элементов [18,34].

Технология сварки высокопрочных сталей осложняется тем, что надо учесть факторы, ответственные за возникновение горячих трещин: химический состав металла шва, определяющий свойства в период кристаллизации, особенно в период пониженной пластичности; растягивающие напряжения, действующие в момент кристаллизации металла шва [16,35,57].

Еще одна проблема при сварке высокопрочных сталей заключается в сложности получения равнопрочности основного металла и сварного соединения. Без достижения или приближения равнопрочности теряется эффект применения этих сталей [20,27,51].

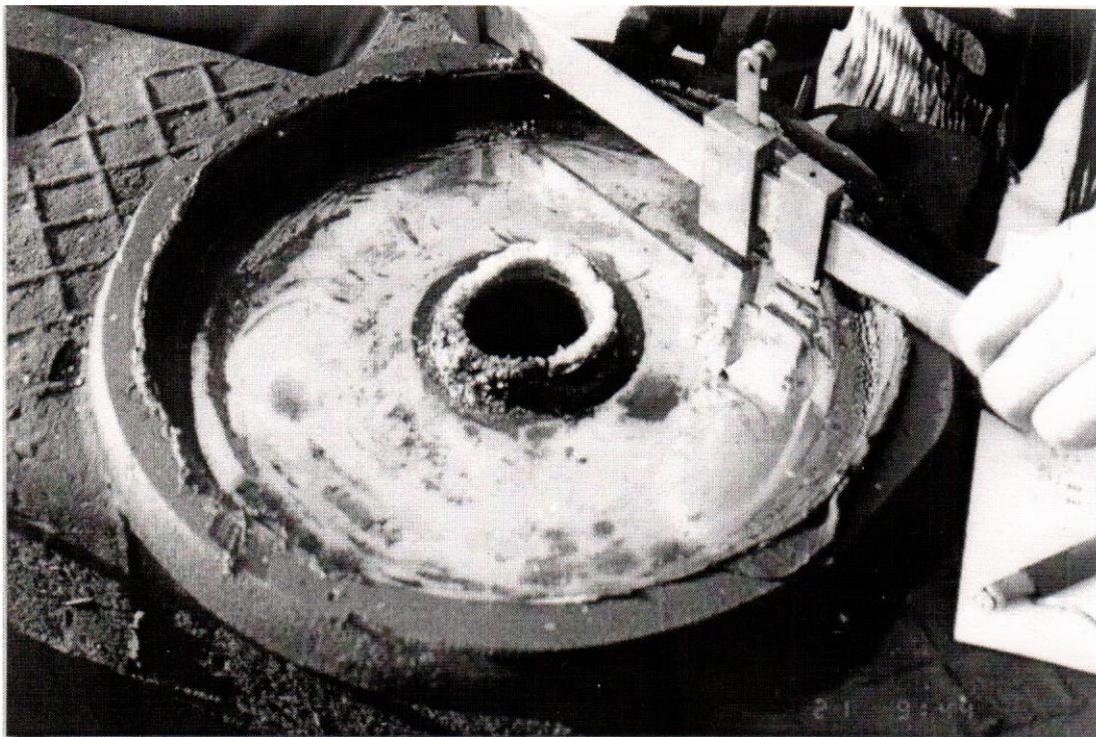
Для достижения равнопрочности сварного соединения и основного металла производят послесварочную термическую обработку, если не существует опасности больших деформаций.

В конце 80-х годов прошлого столетия на дорогах СНГ и, в том числе, на железных дорогах Грузии возникла одна из самых острых проблем – аномально высокий износ гребней колес подвижного состава и боковой поверхности головки рельсов. Кроме того, рабочие поверхности основных деталей тележки грузовых вагонов – надрессорная балка, корпус букса, автосцепное устройство и боковая рама часто выходили из строя. Износ сильно увеличивался на тех участках дороги, где подъем достигал 30^0 и радиус кривизны путей менялся в интервале 150-200 м.

Весьма эффективным технологическим процессом восстановления рабочих поверхностей изношенных деталей является наплавка. Сварка и наплавка повышают технический ресурс новых и восстановленных деталей, позволяют экономить материалы и электроэнергию, уменьшают время и трудоемкость изготовления деталей. Часто восстановленные поверхности обладают большей износостойкостью, чем новые детали.

Восстановление изношенных рабочих поверхностей надрессорной балки (рис.1.4) и гребней колесных пар (рис.1.5) возможно дуговой наплавкой плавящимся электродом, полуавтоматической и автоматической наплавкой в углекислом газе и наплавкой под

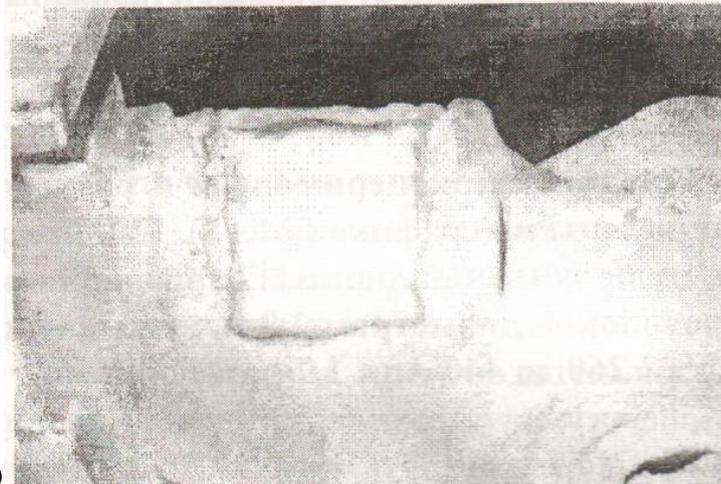
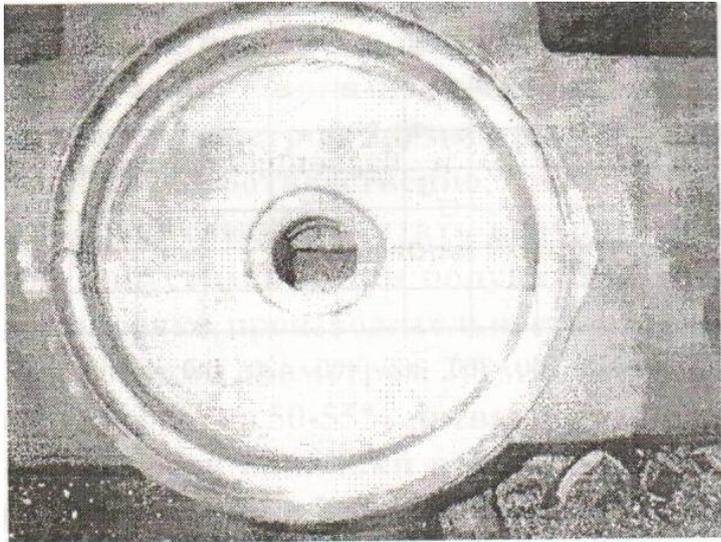
слоем флюса одним электродом или многоэлектродной наплавкой. Результаты экспериментальных исследований показали, что металл, наплавленный под слоем флюса, превосходит по износостойкости металл, наплавленный другими видами наплавки.



а)



Рис.1.4. б)



в)

Рис.1.4.

г)



д)

Рис.1.4. Изношенные (а) и восстановленные изношенных рабочих поверхностей надрессорной балки: б) полуавтоматическая наплавка в углекислом газе; в) наплавка под флюсом одним электродом после пробега 5000 км; г,д) многоэлектродная наплавка под флюсом.



Рис.1.5. а)



б)

Рис.1.5. Наплавленная колесная пара (а) и фрагмент, вырезанный из колесной пары.

1.2.1 Пути предупреждения образования дефектов типа холодных трещин

Холодные трещины является наиболее опасным дефектом сварных соединений из высокопрочных сталей.

Они образуются в сварных соединениях при остывании их ниже 200°C. К этому времени металл шва и околошовной зоны приобретает высокие упругие свойства, присущие ему при нормальных температурах.

Появление холодных трещин в сварных соединениях закаливающих сталей объясняется общепризнанными факторами: мартенситной структурой, диффузионным

водородом, сложным напряженным состоянием. Способы предотвращения этих дефектов в сварных соединениях при сварке закаливающих сталей направлены на устранение вышеописанных факторов.

Распространенным способом предотвращения холодных трещин является предварительный и сопутствующий подогрев, а также послесварочный отпуск сварных конструкций [41,55].

Уменьшение содержания водорода в сварочной ванне приводит также к повышению сопротивляемости образованию холодных трещин [41].

Сравнительно простой путь предупреждения возникновения холодных трещин в сварном соединении – регулирование термического цикла сварки путем выбора соответствующих методов и режимов сварки, а также использования в необходимых случаях предварительного подогрева.

Изменение режимов сварки существенно влияет на образование холодных трещин. Но надо отметить, что уменьшение скорости охлаждения не всегда дает положительный результат.

Если оптимальный режим сварки не способствует предотвращению холодных трещин, следует произвести регулирование термического цикла сварки путем предварительного и сопутствующего подогрева [28].

Наиболее благоприятный результат дает применение подогрева до 400-550°C и режимы сварки с низкой погонной энергией, хотя в некоторых случаях положительный результат против образования холодных трещин можно получить и при подогреве до 100-200°C [73].

Большинство исследователей связывает образование холодных трещин с наличием водорода в металле шва.

Пониженное содержание водорода в металле шва для повышения сопротивляемости образованию холодных трещин высокопрочных закаливающих сталей достигается путем снижения содержания водорода в присадочных материалах. Применение аустенитных сварочных материалов повышает трещиностойкость сварных соединений благодаря тому, что аустенитные швы удерживают практически весь водород и перемещение водорода в околошовную зону затрудняется [33,41,57].

Существует противоположное мнение. Значительное повышение стойкости околошовной зоны против образования холодных трещин, связанное со снижением содержания водорода в металле шва, установлено при применении постоянного тока взамен переменного. Содержание водорода в этом случае снижается в 2-2,5 раза.

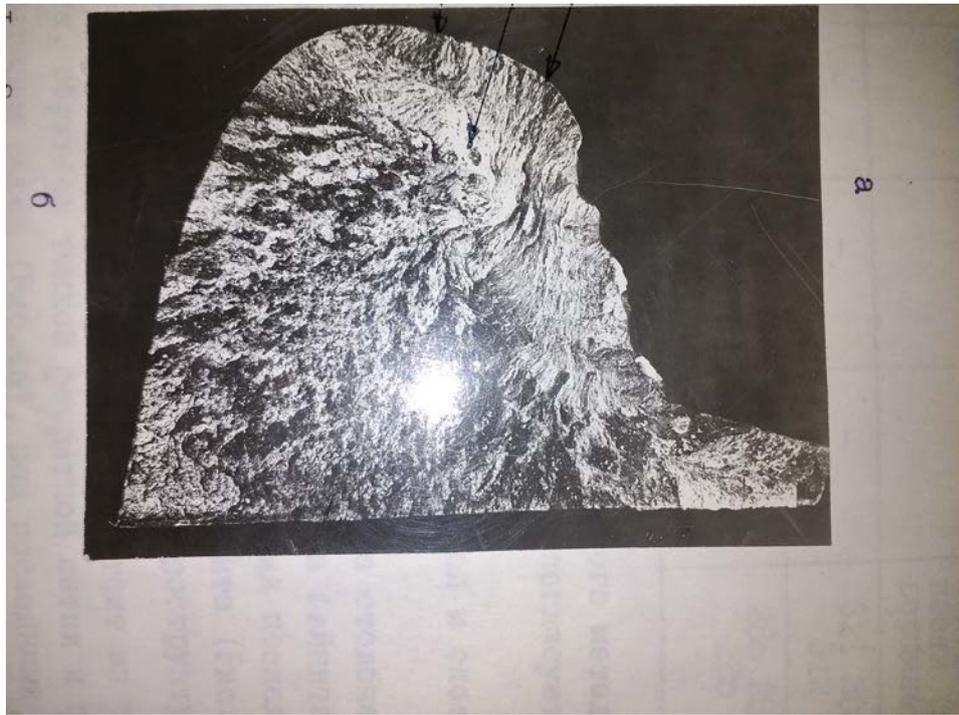
Как отмечается в работе [22], роль водорода в образовании холодных трещин активизируется при повышении содержания углерода и при содержании углерода $C > 0,25\%$ влияние диффузионного водорода становится особенно заметным.

Исходя из вышесказанного, можно сказать, что водород не является единственным фактором, снижающим сопротивляемость сварного соединения образованию холодных трещин, и его влияние надо рассматривать совместно с другими факторами.

При восстановлении изношенных гребней колесных пар незначительные отклонения от рекомендуемой технологии наплавки или нарушении режима наплавки вызывают появление как поперечных, так и продольных холодных трещин и иногда происходит разрушение колесной пары (рис.1.6).



Рис.1.6. а)



б)

Рис.1.6. Изломы колесных пар после разрушения, вызываемого неполным подогревом (а) и образованием флокенов в наплавленном металле (б).

1.2.2 Пути предупреждения образования дефектов типа горячих трещин

Горячие трещины – это межкристаллические разрушения, которые появляются в металле сварного шва и околошовной зоны.

Образование горячих трещин обусловлено соответствующим изменением механических свойств металла при нагреве, в частности, резким снижением его деформационной способности. Причиной такого снижения может быть наличие в металле легкоплавких эвтектик, дефектов кристаллического строения или выделение хрупкой вторичной фазы.

Кристаллизационные трещины являются одним из основных видов брака при сварке.

Характерной особенностью кристаллизационных трещин является межкристаллический вид разрушения. Они тесно связаны с первичной структурой металла шва и расположены вдоль направления роста столбчатых кристаллитов.

При разработке технологии сварки принимают, что стойкость металла шва против кристаллизационных трещин зависит от следующих факторов: величины и скорости нарастания действующих в процессе кристаллизации металла шва растягивающих напряжений; химического состава металла шва, определяющего свойства его в период кристаллизации и длительность пребывания в состоянии, характеризуемом пониженной пластичностью; формы сварочной ванны, определяющей направление роста столбчатых кристаллитов, характер изменения пластической деформации; величины первичных кристаллитов.

В реальных условиях сварки практически невозможно устранить влияние растягивающих напряжений на кристаллизующийся металл сварочной ванны. Поэтому, задача сводится к уменьшению величины этих напряжений, к отдалению момента возрастания их до значения, которое может вызвать пластическую деформацию металла шва, приводящую к его разрушению.

Уменьшение влияния растягивающих напряжений за счет технологических мер достигается путем предварительного подогрева, рационального порядка наложения швов и выбора способов и режимов сварки, обеспечивающих минимальную величину этих напряжений [28,39,53].

Химический состав металла шва оказывает первостепенное влияние на его стойкость против кристаллизационных трещин. Все элементы, входящие в состав металла шва, условно могут быть отнесены к трем основным группам.

Первая группа – элементы, присутствие которых снижает стойкость металла шва против кристаллизационных трещин. Такие элементы принято называть вредными (сера и фосфор).

Вторая группа – элементы, которые в зависимости от их сочетания и концентрации оказывают положительное (полезные примеси) или отрицательное (вредные примеси) влияние на стойкость металла шва против кристаллизационных трещин (кремний, марганец, никель, хром).

Третья группа – элементы, присутствие которых не оказывает влияния на стойкость металла шва против кристаллизационных трещин.

Форма сварочной ванны при дуговых процессах характеризуется длиной, шириной и глубиной проплавления основного металла. Время нахождения металла в жидком состоянии в различных ее участках неодинаково.

Возможности управления *формой сварочной ванны* практически неограничены. Хорошо известно, что изменяя параметры режима сварки (ток, напряжение дуги, скорость сварки при дуговой сварке; ширину зазора, глубину шлаковой ванны, напряжение на

ванне, скорость сварки при электрошлаковой сварке; ускоряющее напряжение, ток, скорость сварки при электроннолучевой сварке), можно в самых широких пределах, изменять форму ванны.

В поперечном сечении, в зависимости от режима и условий сварки, *форма сварочной ванны* изменяется в широких пределах. Наиболее характерной для дуговой сварки является форма провара, приближающаяся к полуокружности. При лучевых способах сварки форма ванны напоминает острый клин-кинжал. При выборе режимов сварки необходимо обратить внимание на несколько факторов: при снижении режимов сварки (сварочный ток и напряжения) увеличивается сопротивляемость образованию горячих трещин и, наоборот, с увеличением параметров режимов наплавки этот показатель уменьшается [29].

Форма сварочной ванны определяется режимом сварки, поэтому для обеспечения высокой стойкости металла шва против образования трещин следует соответствующим образом выбирать режим сварки и, в первую очередь, скорость подачи электродной проволоки, от которой зависит глубина металлической ванны.

На характер кристаллизации и, соответственно, на образование горячих трещин влияет *форма сварочной ванны*. Особенно сильно это влияние заметно при автоматической сварке. В последнем случае получается удлиненная ванна с неблагоприятной направленностью роста кристаллов, что вызывает появление горячей трещины по оси шва. Желательно получать широкую и короткую форму ванны. Это достигается уменьшением скорости сварки.

Изменение способа и режима сварки приводит к изменению *формы сварочной ванны* (формы шва) и, как следствие, к изменению направления роста столбчатых кристаллитов и характера их взаимного срастания [29].

При сварке углеродистых и низколегированных сталей большую роль в появлении кристаллизационных трещин играет сера, образующая легкоплавкие соединения. Однако влияние серы зависит от вида и количества легирующих компонентов в металле. Большое число экспериментальных данных свидетельствует о том, что появлению кристаллизационных трещин в значительной мере способствует повышение концентрации углерода в металле. При сварке высоколегированных сталей углерод может стать непосредственной причиной возникновения кристаллизационных трещин. В меньшей мере на процесс образования трещин влияет содержание кремния. Особенно кремний способствует этому при сварке аустенитных хромоникелевых сталей. Возрастает склонность металла шва к появлению кристаллизационных трещин и при наличии в металле фосфора [28]. К наиболее распространенным элементам, которые снижают

опасность образования кристаллизационных трещин, относятся марганец и хром. На появление трещин в металле шва влияет также *форма сварочной ванны*, обуславливающая скорость кристаллизации металла, а также напряженное состояние металла шва. Если сварочная ванна имеет форму, близкую к форме падающей капли, в ее хвостовой части возникают высокие растягивающие напряжения, облегчающие образование трещин. От формы шва зависит и критическое содержание углерода и кремния в металле, при котором возникают кристаллизационные трещины.

Несмотря на принимаемые меры, в некоторых случаях при восстановлении наплавкой изношенных поверхностей деталей грузовых вагонов, возникают горячие трещины в наплавленном металле, наличие которых недопустимо по технологии – необходимо эти трещины или удалять, или же эти детали бракуются (рис.1.7).

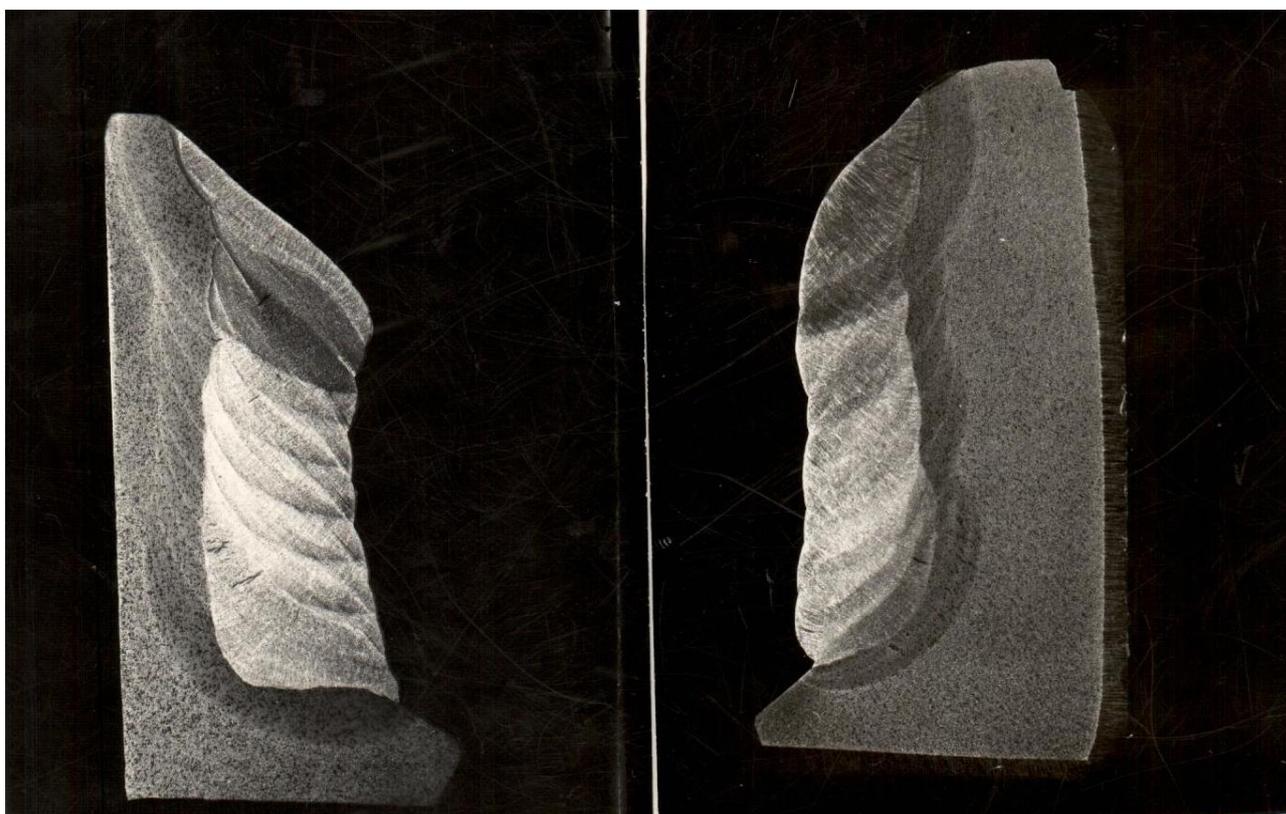


Рис. 1.7. Микрошлифы с горячими трещинами, вырезанные из наплавленной колесной пары.

1.2.3 Материалы, применяемые при наплавке

Для получения заданного качества наплавленного слоя при восстановлении деталей первостепенное значение имеет правильный выбор сварочных материалов. Выбор сварочных материалов зависит от химического состава основного металла и с учетом предупреждения возникновения разных дефектов.

В зависимости от назначения можно выделить следующие группы электродов, сварочных проволок и лент:

- для наплавки деталей, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания;
- для наплавки деталей, работающих при воздействии ударных нагрузок;
- для наплавки деталей, работающих в условиях ударно-абразивного изнашивания;
- для наплавки деталей, работающих при трении металла по металлу [21,38].

При сварке и наплавке высокопрочных и особенно высокоуглеродистых сталей выбор сварочных материалов (проволок) происходит с учетом того, что содержание углерода в наплавленном металле ограничено, т.е. выбирают сварочные проволоки с низким содержанием углерода и легирующих элементов. Износостойкость наплавленного металла компенсируется за счет карбидообразующих легирующих элементов или послесварочной термической обработки.

Стальную сварочную проволоку изготавливают по ГОСТ 2246-70 и по специальным техническим условиям. В зависимости от химического состава проволока по ГОСТ 2246-70 разделяется на низкоуглеродистую, легированную и высоколегированную.

Химический состав некоторых сварочных проволок для сварки высокоуглеродистых сталей приведен в таблице 1.2 [30,50].

Таблица 1.2 Состав легированных сварочных проволок

Марка проволоки	С	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	S	P	Другие элементы
							не более		
Св-08Г2С	0,05- 0,11	1,80- 2,10	0,70- 0,95	≤0,20	≤0,25	-	0,025	0,030	-
Св-08ГСМТ	0,06- 0,11	1,00- 1,30	0,40- 0,70	≤0,30	≤0,30	0,20- 0,40	0,025	0,030	0,05-0,12 Ti
Св-08МХ	0,06- 0,10	0,35- 0,60	0,12- 0,30	0,45- 0,65	≤0,30	0,40- 0,60	0,025	0,030	-
Св-08ХНМ	≤0,10	0,50- 0,80	0,12- 0,35	0,70- 0,90	0,80- 1,20	0,25- 0,45	0,025	0,030	-
Св-08ХМФА	0,06-	0,35-	0,12-	0,90-	≤0,30	0,50-	0,025	0,025	0,15-0,30

	0,10	0,60	0,30	1,20		0,70			V
Св-08ХГСМФА	0,06- 0,10	1,20- 1,50	0,45- 0,70	0,95- 1,25	≤0,30	0,50- 0,70	0,025	0,025	0,20-0,35 V
Св-08ХМ	0,06- 0,10	0,35- 0,60	0,12- 0,30	0,90- 1,20	≤0,30	0,50- 0,70	≤0,025	≤0,030	
Св-08ХГ2СМФ	0,06- 0,10	1,50- 1,80	0,40- 0,70	0,90- 1,20	-	0,50- 0,70	≤0,025	≤0,030	

Проволока сварочная из сталей с низким содержанием углерода Св-08; Св-08А и легированных Св-08ГС; Св-08Г2С. По виду поверхности проволока производится неомедненной и омедненной. Толщина медного покрытия - 6 мкм. Поверхность проволоки должна быть чистой и гладкой, без трещин, расслоений, плен, закатов, забоин, окалины, ржавчины, масла и др. загрязнений. Допускаются отдельные риски, царапины, местная рябизна, вмятины глубиной не более предельного отклонения по диаметру.

Сварочная проволока СВ08Г2С по большинству показателей имеет высокие характеристики и применяется во многих отраслях. Полированная проволока для сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей в углекислом газе и газовой смеси. Обеспечивает образование надежных и аккуратных швов, гарантирует стабильное горение дуги.

Св-08ГСМТ - омедненная полированная проволока для сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей в газовой смеси.

Св-08МХ - омедненная полированная проволока для сварки теплоустойчивых и низколегированных сталей типа ХМ, а также металлоконструкций в газовой смеси. Обеспечивает образование надежных и аккуратных швов, гарантирует стабильное горение дуги.

Св-08ХМФА - омедненная полированная проволока для сварки теплоустойчивых и низколегированных сталей типа ХМ, а также металлоконструкций в газовой смеси. Обеспечивает образование надежных и аккуратных швов, гарантирует стабильное горение дуги.

Св-08ХГСМФА - омедненная полированная проволока для сварки теплоустойчивых и низколегированных сталей типа ХМ, а также металлоконструкций в газовой смеси. Обеспечивает образование надежных и аккуратных швов, гарантирует стабильное горение дуги.

Проволока СВ-08ХГ2СМФ, выпускаемая по ТУ-14-130-284-37. Часто применяется для восстановления наплавкой изношенных поверхностей деталей подвижного состава железнодорожного транспорта [30].

При восстановлении изношенных деталей наплавкой под слоем флюса широко применяются высококремнистый марганцевые флюсы: АН-348-А, АН-348-АМ, ОСЦ-45, ОСЦ-45М, АН-60 и др. [30,50].

Эти флюсы хорошо работают в сочетании с вышеуказанными сварочными проволоками, кроме того они обладают хорошими сварочными технологическими свойствами, особенно надо отметить хорошую отделимость шлака после наплавки [30].

Получение качественных швов на углеродистых и низколегированных конструкционных сталях в настоящее время практически достигается применением следующих сочетаний флюсов и сварочных проволок [30]:

- плавный высококремнистый марганцевый флюс и обычная низкоуглеродистая сварочная проволока;
- плавный высококремнистый без марганцевый флюс и низкоуглеродистая марганцовистая сварочная проволока;
- керамический флюс и обычная низкоуглеродистая сварочная проволока.

Сравнение этих сочетаний флюса и проволоки показывает, что сварочные свойства высококремнистых марганцевых флюсов несколько лучше, чем высококремнистых безмарганцевых. Положительным свойством высококремнистых марганцевых флюсов является высокая стойкость сварных швов против образования кристаллизационных трещин. Это обусловлено малым переходом серы из флюсов данного типа в металл шва и сравнительно сильным выгоранием углерода из металла сварочной ванны [30].

При сварке под высококремнистыми марганцевыми флюсами пористость сварных швов меньше, чем при сварке под высококремнистыми безмарганцевыми флюсами.

К высококремнистым марганцевым флюсам относятся АН-348-А, ОСЦ-45, АН-348-АМ, АН-60 и др. [30].

Состав сварочных плавных флюсов, которые широко применяется для сварки и наплавки, приведен в таблице 1.3 [30].

Таблица 1.3 Состав сварочных плавных флюсов

Марка флюса	SiO ₂	MnO	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O и K ₂ O	CaF ₂	Fe ₂ O ₃	не более		
									S	P	C
АН-348-А	41,0-44,0	34,0-38,0	≤6,5	5,0-7,5	≤4,5	-	4,0-5,5	2,0	0,15	0,12	-
ОСЦ-45	38,0-44,0	38,0-44,0	≤6,5	≤2,5	≤5,0	-	6,0-9,0	2,0	0,15	0,15	-
АН-348-АМ	41,0-44,0	34,0-38,0	≤6,5	5,0-7,5	≤4,5	-	3,5-4,5	2,0	0,15	0,12	-
АН-60	42,5-46,5	36,0-41,0	3,0-11	0,5 -3,0	≤5,0	-	5,0-8,0	1,5	0,15	0,15	-

1.3 Модели расчета пластического деформирования наплавленного слоя

Обкатка наплавленного слоя относится к классу технологических процессов обработки металлов давлением. Задачи расчетов технологических процессов обработки металлов обычно решаются на основе одной из принятых в теории пластичности моделей тел (чаще всего жестко идеальнопластического, иногда упруго идеальнопластического или жестко упрочняющегося тела). Поскольку в таком случае в уравнения состояния не входят скорости деформаций, эти решения не позволяют отразить скорости движения деформирующего инструмента на усилия формоизменения и напряженно-деформированное состояние наплавленного слоя.

Это влияние особенно значительно, если металл деформируется при высоких температурах и напряжениях. В таком случае, несмотря на сравнительно небольшое время деформирования, существенное значение имеет вязкость металла и поэтому расчеты технологических процессов обработки металлов следует основывать на уравнениях состояния, в которых содержатся скорости деформаций, т.е. на уравнениях, отражающих реономные свойства металлов – на уравнениях теории ползучести.

Реологические модели для описания технологических задач пластического формоизменения металлов использованы в трудах Г. Генки, А.А. Ильюшина, А.Ю. Ишлинского, Н.Н. Малинина, К.И. Романова, О. Зенковича, Н. Кристеску, С. Танга, Д. Дурбана и др.

Первые попытки использовать уравнения реономных тел для решения технологических задач принадлежат А.А.Ильюшину, А.Ю.Ишлинскому, Г.Генки. Дальнейшее развитие это направление получило в трудах Н.Н.Малинина и др.[45,47,58], в которых технологические задачи решены на основе технических теории ползучести, таких как теории течения и упрочнения, а также с помощью уравнения состояния нелинейно-вязкого тела. Принципиальная возможность исследования процессов формоизменения реономных тел показана в работах А.А Ильюшина [18], А.Ю. Ишлинского [19] и Г.Генки [14], в которых использовано уравнение деформирования вязкопластического тела

$$\sigma_e = \sigma_T + \gamma \dot{\xi}_e \quad (1.1)$$

где σ_e и $\dot{\xi}_e$ - эквивалентное напряжение и эквивалентная скорость деформации соответственно; γ - постоянная, пропорциональна вязкости материала; σ_T - предел

текучести (σ_T и γ определяют экспериментально; при $\sigma_e < \sigma_T$ среда не испытывает деформаций).

В трудах Н.Н. Малинина и его сотрудников [45] расчеты технологических процессов обработки металлов основаны на уравнениях теории ползучести (течения или упрочнения).

В работе Генки [14] рассматривается вращение прокатного вала в пластическом материале. В работе А.А. Ильюшина [18] выведены основные уравнения вязкопластического течения и рассмотрены ряд задач, в том числе вращение цилиндра в вязкопластической среде. В работе А.Ю. Ишлинского [19] решена задача прокатки и волочения полосы в условиях плоской деформации.

Некоторые технологические процессы (например, сварка) связаны с локальным нагревом материала до высокой температуры. В таких процессах неравномерность теплового расширения создает напряжения, интенсивность которых может превысить предел пластичности материала при текущей температуре. Это приводит к тому, что после охлаждения в материале сохраняются отличные от нуля деформации и напряжения, которые могут отрицательно сказаться на его качествах [2].

Поверхностное пластическое деформирование обеспечивает изменение структуры металла, но без его полной рекристаллизации. Важной характеристикой состояния поверхностного слоя являются остаточные напряжения.

При проектировании операций поверхностного пластического деформирования, заменяющих, например, операции точения, шлифования, полирования или доводки, необходимо помнить о следующих преимуществах поверхностного пластического деформирования:

- отсутствуют термические дефекты;
- стабильны процессы обработки, обеспечивающие стабильное качество поверхности;
- можно уменьшить шероховатость поверхности в несколько раз за один технологический переход или операцию;
- создается благоприятная форма микронеровностей с большой долей опорной площади;
- создаются благоприятные сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое;
- плавно и стабильно повышается микро твердость в поверхностном слое.

Остаточное напряжение в пластинах определяют обычно в двух направлениях: вдоль шва σ_x и поперек шва σ_y , третий компонент σ_z в элементе толщиной до 15-20 мм незначителен.

Основные задачи по определению продольных напряжений базируются на известных допущениях и гипотезах, которые не всегда позволяют получить результат, подтверждаемый экспериментами [64,66]

Для определения остаточных деформаций широко используют расчетные методы. Задача определения деформаций (перемещений) от сварки представляет собой два раздела, термомеханический и деформационный. Термомеханическое решение сводится к определению величины усадочной силы, поперечной усадки по длине и толщине соединения и других элементов деформаций, возникающих в зоне сварочного соединения. Исходные элементы деформации, определяемые из термомеханического решения, связывают с режимами сварки, видом соединения и другими факторами, которые оказывают влияние на развитие деформаций в процессе сварки.

В работе [23] дан расчет сопротивления деформированию при термомеханической обработке (ТМО) наплавленных поверхностей. Рассматривается одномерная задача определения напряжений в очаге деформации на основе гипотезы плоских сечений. Считается, что нормальные напряжения в поперечном сечении постоянны, деформированное состояние плоское.

Условие пластичности в очаге деформации записано с использованием, так называемого вынужденного предела текучести в виде:

$$K = \beta \sigma_T \quad (1.2)$$

Здесь σ_T - базовый предел текучести, $\beta = 1 - 1,5$ коэффициент Лоде.

Считается, что вынужденный предел текучести не меняется по контакту. В результате получено выражение для расчета усилия деформирования на поверхности контакта ролика и деформированного слоя т.е. сопротивление деформированию при ТМО наплавленных поверхностей.

$$P = \frac{\xi \ell K \bar{B}}{\Delta h \zeta h_o^\zeta} (h_o^{\zeta+1} - h_1^{\zeta+1}) - \xi \ell \bar{B}. \quad (1.3)$$

где, K - вынужденный предел текучести; \bar{B} - средняя величина; Δh - обжатие;

ℓ - длина зоны.

Недостатком данной работы является то, что уравнение (1.2) не описывает зависимость напряженно-деформированного состояния материала в очаге деформации и усилия деформирования при повышенных температурах от скорости перемещения ролика. Экспериментальные исследования многих авторов [26,45,46,58], показывают, что

уравнение (1.2) не описывает состояние металлов при повышенных температурах и расчет технологических процессов необходимо вести на основе реологической модели. Относительно общей является уравнение состояния на основе теории ползучести, теории упрочнения Людвига – Надаи – Давенпорта [46]. С точки зрения геометрии деформирования недостатком данной работы является гипотеза плоских сечений и для более точного описания напряженно-деформированного состояния необходимо рассмотреть задачу в многомерной постановке (двумерную или трехмерную).

В основу принципиальных возможностей снижения или устранения сварочных деформаций и напряжений могут быть положены три пути, учитывающие физическую сущность процессов, происходящих при сварке [59]:

1. Снижение величины пластической деформации укорочения либо ширины зоны ее распространения при нагреве путем регулирования термического воздействия при сварке, уменьшения погонной энергии, введения предварительного подогрева, приложения усилий при сварке.
2. Увеличение пластических деформаций удлинения либо в процессе охлаждения сварного шва, либо после сварки путем прокатки, проковки, растяжения, вибрации и т.д.
3. Компенсация путем создания предварительных деформаций, обратных по знаку сварочным, рациональной последовательностью сборки и сварки.

Существует много приемов, позволяющих уменьшить или устранить сварочные деформации и напряжения.

Способы борьбы с деформациями и напряжениями можно разделить на две группы:

- 1) способы предупреждения и регулирования деформаций;
- 2) способы устранения деформаций и напряжений после сварки.

К первой группе относятся такие способы, которые предусматривает воздействие на тепловые характеристики сварочного процесса, геометрические размеры и форму конструкции в процессе сварки, физические характеристики и структуру материала изделия и шва.

В работе [69] исследован тепловой процесс возникающих в зоне деформации. Тепловые процессы, происходящие при наплавке деталей и поверхностной пластической деформации, в значительной мере определяют физико-механические свойства и износостойкость поверхностного слоя и оказывают большое влияние на процессы и производительность пластической деформации [32,72].

Базируясь на работах В.И.Махненко, А.А.Орлова, Н.И.Бойко, на основе известных методических подходов Н.Н.Рыкалина, в работе [69] получен ряд решений, позволяющих определить температуру наплавленного металла в зонах пластической деформации.

Температуру наплавленного валика в зоне деформации определяли по общеизвестному уравнению А.А.Орлова, применительно к наплавке толстостенных или сплошных цилиндров.

Определение температуры по длине наплавляемой детали в зоне деформации в момент выключения сварочной дуги основано на предпосылке, что температура предельного состояния наплавленной детали в зоне деформации равна температуре последнего наплавленного валика:

$$T_{nn} = \sum_1^{i-1} T_{i=m}^{t1} + T_{A1}^{t1} \cos \varphi_x + T_0,$$

где m — общее количество наплавленных валиков.

Температуру любой точки наплавленного металла в зоне деформации детали сразу после прекращения действия источника, используя уравнение Н.Н. Рыкалина, представим в виде

$$T_{Aii} = T_m \cdot \psi_{Ai} (p_{Ai}; \tau_{Ai})_x C^0$$

где ψ_{Ai} — коэффициент теплоносущения определяемой точки в зоне деформации.

В данной работе положительно исследован тепловой процесс возникающий в зоне деформации, но не затрагивается обработка наплавленного слоя и не исследованы характеристики тепловых процессов.

1.4 Постановка задач исследования

Приведенный выше анализ показывает, что восстановление поврежденных поверхностей деталей является сложным физико-механическим процессом. Для получения наиболее приемлемого результата необходимо достаточно точно подобрать основные параметры технологического процесса путем теоретических расчетов и экспериментального исследования в лабораторных условиях.

Для теоретического исследования был выбран один из этапов технологического процесса наплавки, в частности, пластическое деформирование наплавленного слоя путем обкатки жестким роликом при повышенных температурах. Обкатка применяется для обработки сварного шва с целью снижения уровня остаточных напряжений и улучшения структуры слоя. Наилучший эффект получается при пластическом деформировании слоя в изотермических условиях при температуре наплавки. Теоретические исследования необходимо вести на основе закономерностей механики деформируемого твердого тела с учетом реальных механических свойств материала при высоких температурах.

Существенно отметить объем поврежденных поверхностей деталей в результате износа, при работе в агрессивных средах и экономический эффект от восстановления работоспособности деталей по сравнению с изготовлением нового. Поэтому тема диссертационной работы актуальна.

Объектом исследования избран технологический процесс продольной обкатки наплавленного слоя на плоской поверхности цилиндрическим роликом при повышенных температурах.

На основе критического анализа сформулирована цель и задачи исследования.

Целью диссертационной работы является разработка методов расчета одномерной и двумерной задачи пластического деформирования и экспериментальное исследование наплавленного слоя при восстановлении плоских поверхностей деталей.

Для достижения этой цели в диссертационной работе решены следующие задачи:

- выбор уравнения состояния материала при повышенных температурах на основе технической теории ползучести;
- постановка одномерной задачи продольной обкатки наплавленного слоя цилиндрическим роликом с учетом закона трения Кулона на поверхности контакта материала с роликом и расчет напряженно-деформированного состояния в очаге деформации на основе теории ползучести – упрочнения;
- численное решение одномерной нелинейной задачи и определение компонентов напряжений и силовых факторов технологического процесса с использованием современных систем численного анализа;
- постановка двумерной задачи продольной обкатки наплавленного слоя на основе теории упрочнения, получение замкнутой системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных и формулировка граничных условий;
- разработка алгоритма решения дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных разностей;

- экспериментальное исследование качества наплавленного слоя при восстановлении плоской поверхности;
- выбор оптимального режима и технологии наплавки, увеличивающий сопротивляемость появлению дефектов типа трещин;
- выбор оптимальной температуры обработки наплавленной поверхности в зависимости от площади наплавленного металла.

2. ОБКАТКА НАПЛАВЛЕННОГО СЛОЯ НА ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСИ. ОДНОМЕРНАЯ ЗАДАЧА

Одним из основных способов, широко применяемых для устранения остаточных деформаций и улучшения структуры при наплавке поверхностей деталей является обкатка. Обкаткой осуществляется осаживание металла по толщине в зоне шва для создания пластических деформаций удлинения в продольном и поперечном направлениях.

Обкатка осуществляется стальными цилиндрическими роликами. К числу основных параметров, характеризующих технологический процесс, относятся: усилие при обкатке на ролик, радиус и ширина рабочей части ролика, толщина металла в зоне обкатки, параметры состояния материала [61].

Полное устранение остаточных деформаций достигается в том случае, если создаваемые обкаткой пластические деформации удлинения в слое и прилегающих участках основного металла окажутся равными по значению остаточным пластическим деформациям укорочения в этих зонах. Остаточные продольные напряжения в этом случае могут оказаться близкими нулю. Наряду с устранением продольных остаточных деформаций, обкатка приводит к устранению перемещений конструкции, вызванных потерей устойчивости от действия продольных остаточных напряжений. Рекомендуемые параметры воздействия находят по приближенным формулам по схеме одноосного напряженного состояния [61]. При этом вводится условие осаживания зоны обкатки в виде задаваемых деформаций ε_z по толщине элемента.

Для правильного учета эффекта осаживания по толщине нагретого материала, оценки изменения остаточных напряжений и деформаций, необходимо исследовать напряженно-деформированное состояние металла слоя, на основе которого вычисляются, также, деформирующее усилие и суммарная мощность.

Как было сказано выше, при повышенных температурах расчет технологических процессов обработки металлов целесообразно вести на основе уравнений состояния простейших теорий ползучести. Наиболее общей в этом отношении является теория упрочнения. В рассматриваемом случае, в отличие от обычного процесса прокатки между вращающимися приводными валками, деформирующий ролик совершает плоско-параллельное перемещение, а на контактных поверхностях имеют место различные условия трения.

2.1 Уравнение состояния материалов при повышенных температурах

Экспериментальные данные показывают [45,58], что деформирование металлов в процессе обработки при высоких температурах характеризуется значительным влиянием

скоростей деформаций на напряжения. Поэтому расчет напряжений и деформаций необходимо вести на основе уравнения состояния реономных тел.

Для установления зависимости между деформациями, напряжениями, скоростями их изменения и временем в простейшем случае одноосного растяжения необходима теория, которая называется теорией ползучести.

Она должна дать возможность на основании простейших испытаний материала, например, на основании экспериментального изучения ползучести при постоянном напряжении, описать деформирование материала в общем случае изменяющихся во времени напряжений и деформаций, а также обеспечить определение закона изменения деформаций по заданному закону изменения напряжений и наоборот. В частном случае она должна позволить построить кривые релаксации по серии кривых ползучести. Наиболее простым, но не наилучшим методом проверки теории ползучести является сопоставление результатов экспериментального исследования релаксации при постоянной деформации с данными, получаемыми по теории ползучести.

Существующие в настоящее время теории ползучести можно условно разделить на простейшие (технические) и наследственные. Первые являются гипотезами о том, между какими переменными существует функциональная зависимость.

В простейших теориях выбираются три из следующих четырех переменных: деформация, скорость деформации, напряжение и время. После выбора основных переменных нужно связать их определенной аналитической зависимостью. Очевидно, что можно предложить различные зависимости для связи переменных. Наилучшей будет та, которая наиболее полно согласуется с данными опытов. Поэтому естественно, что в процессе поисков наилучшей аналитической зависимости возможны различные предложения и, следовательно, различные варианты одной и той же теории.

Для описания процессов ползучести металлов в настоящее время большее применение нашли простейшие теории ползучести. Применение простейших теорий в задачах обработки металлов позволяет получить достоверные результаты с меньшей затратой труда и времени. В настоящее время существует три простейшие теории: старения, течения и упрочнения. Как известно [46], теория старения хуже согласуется с результатами экспериментальных исследований, чем теория течения и упрочнения, и плохо отражает процесс ползучести при резко изменяющихся нагрузках. Необходимо также отметить теорию структурных параметров Ю.Н.Работнова, частным случаем которой является теория течения и теория упрочнения. Исследования показывают, что теория упрочнения лучше согласуется с данными опытов [45,46]. Поэтому, для

исследования технологической задачи обкатки наплавленного слоя используем уравнение состояния материала на основе теории упрочнения [24,25].

Построение теории ползучести обычно выполняют для простейшего случая одноосного растяжения, а затем для общего случая неодносного напряженного состояния. Теория упрочнения была предложена Людвигом, Надаи и Давенпортом. Дальнейшее развитие ее принадлежит Ю.Н.Работнову.

Согласно теории упрочнения предполагается, что при заданной температуре между скоростью деформации ползучести, напряжением и деформацией ползучести существует определенная зависимость

$$\xi(\varepsilon)^\beta = f(\sigma), \quad (2.1)$$

причем предполагается, что $f(0) = 0$. Для функции напряжения были предложены разные выражения. Для исследования технологических задач широко используется зависимость [45,46]:

$$f(\sigma) = \alpha \sigma^\nu, \quad (2.2)$$

где α, β, ν - коэффициенты для определенного материала, зависящие от температуры. Очевидно, при определенной температуре эти коэффициенты постоянны.

Часто, зависимости (2.1) и (2.2) представляются в виде

$$\sigma = a \xi^m \varepsilon^n, \quad (2.3)$$

где a, m, n - постоянные материала при определенной температуре.

Для неодносного напряженного состояния зависимость (2.3) имеет вид

$$\sigma_e = a \xi_e^m \kappa^n, \quad (2.4)$$

где $\kappa = \int \xi_e dt$ - параметр Удквиста, σ_e - эквивалентное напряжение, ξ_e - эквивалентная скорость деформации.

Как частный случай, из теории упрочнения вытекает уравнение нелинейно вязкого тела, широко используемое при анализе течения в состоянии сверхпластичности

$$\xi_e = K \sigma_e^\nu, \quad (2.5)$$

где K, ν - постоянные материала при определенной температуре.

Для одноосного напряженного состояния уравнение (2.5) имеет вид

$$\xi = K\sigma^v \quad (2.6)$$

Из уравнения (2.4), как частный случай (при $m=0$), получается уравнение, используемое для исследования деформирования чисто пластичных материалов, в том числе идеально жестко пластического материала (при $m = 0, n = 0$).

Для численных расчетов напряженно-деформированного состояния слоя в очаге деформации необходимо знать значения постоянных материалов при температуре формоизменения. Постоянные материала (параметры уравнения состояния) определяются путем обработки кривых ползучести. Уравнение состояния (2.3) описывает кривые ползучести с явно выраженным участком упрочнения (первый участок) а уравнение состояния (2.6) описывает кривые ползучести, на которых нет участка упрочнения и явно выражен участок установившийся ползучести (второй участок).

Методики определения параметров уравнения состояния приведены в трудах [26,27,45,46,58]. Степень совпадения экспериментальных и теоретических кривых ползучести зависит от точности определения параметров уравнения состояния (постоянных материала). От точности постоянных материала зависит надежность расчета напряженно-деформированного состояния и силовых параметров технологического процесса.

2.2 Пластическое деформирование наплавленного слоя.

Постановка одномерной задачи

Одномерная задача неупругого деформирования наплавленного слоя при обкатке была исследована и представлены основные результаты в работе [24].

Рассмотрим деформирование материала под действием абсолютно жесткого цилиндрического тела (ролика), которое совершает плоскопараллельное движение в плоскости чертежа (рис.2.1). Деформируемый материал находится на жесткой поверхности. Обозначим скорость перемещения центра ролика через v_0 , а угловую скорость вращения - ω . Считается, что они постоянные во времени величины.

Компоненты скорости перемещения любой точки на поверхности контакта материала с роликом в очаге деформации (рис.2.1):

$$v_y = v_0 - \omega R \cos \alpha; v_z = -\omega R \sin \alpha. \quad (2.7)$$

Предположим, что напряженно-деформированное состояние материала меняется только по координате y . Тогда из условия равновесия элементарного объема тела имеем следующие уравнения (рис.2.2):

$$\frac{d\sigma_y}{dy} + \frac{\sigma_y + p}{h} \operatorname{tg} \alpha + \frac{q - q_1}{h} = 0, \quad (2.8)$$

$$\sigma_z = p - q \operatorname{tg} \alpha, \quad (2.9)$$

где σ_y, σ_z – компоненты напряжений, p, q – давление и интенсивность сил трения, соответственно, на поверхности контакта материала с роликом, q_1 – интенсивность сил трения материала с жесткой поверхностью.

1

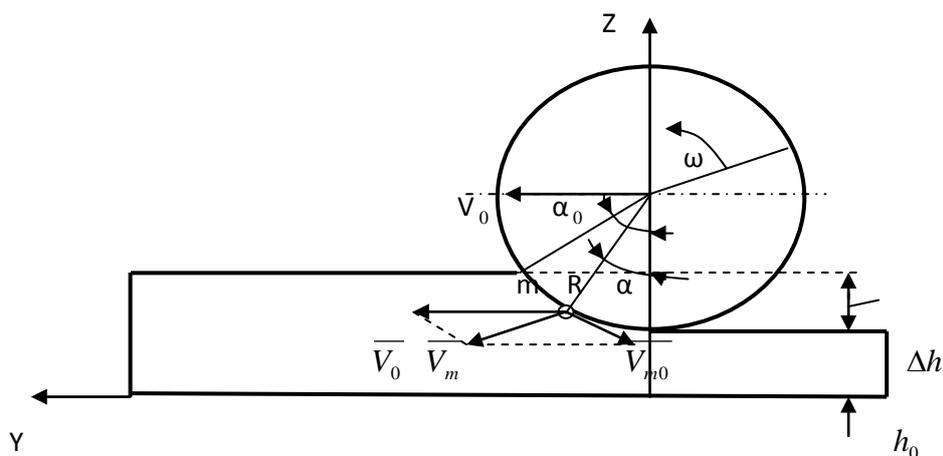


Рис.2.1 Схема обкатки:

R -радиус ролика, Δh -изменение толщины слоя, h_0 -толщина прокатанного слоя, α_0 – максимальный угол контакта, α -угловая координата точки m , ω -угловая скорость вращения ролика, \bar{V}_0 – вектор скорости перемещения центра ролика, \bar{V}_m - вектор скорости перемещения точки m на поверхности контакта, \bar{V}_{m0} -вектор скорости вращения точки m относительно центра ролика

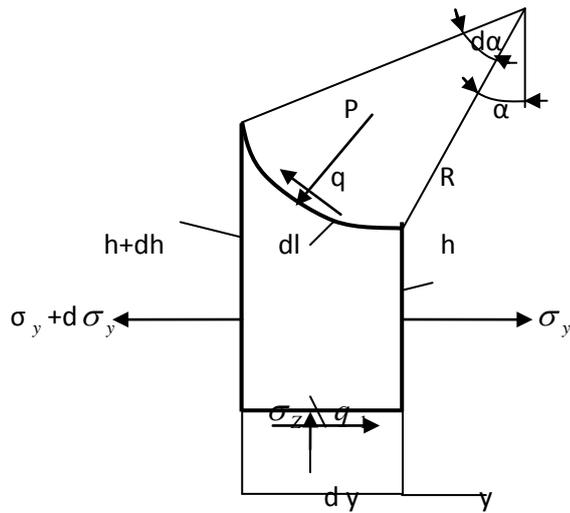


Рис.2.2 К выводу уравнения равновесия элемента

В технологических задачах такого рода в одномерной постановке эквивалентное напряжение σ_e приближенно вычисляется как [47]:

$$\sigma_e = \sigma_y - \sigma_z \quad (2.10)$$

Для упрощения решения примем, что трение на поверхности контакта материала с роликом подчиняется закону Кулона $q = \mu p$, причем коэффициент пропорциональности μ постоянен по всей поверхности контакта. Интенсивность сил трения на поверхности контакта материала с жесткой поверхностью принимается пропорциональной максимальному касательному напряжению

$$q_1 = \chi \tau_{\max} = \chi(\sigma_y - \sigma_z)/2 = \chi \sigma_e / 2, \quad (2.11)$$

где χ - постоянный коэффициент пропорциональности. При $\chi=1$ имеет место прилипание.

Из рис.2.2 очевидно, что $h = h_0 + R(1 - \cos \alpha)$, $dy = R \cos \alpha d\alpha$. Учитывая в уравнении (2.8) соотношения (2.9), (2.10), (2.11), а также последние равенства, после несложных преобразований получается дифференциальное уравнение:

$$\frac{d\sigma_y}{d\alpha} + \psi_1(\alpha)\sigma_y = \psi_2(\alpha), \quad (2.12)$$

где введены обозначения:

$$\begin{aligned}\psi_1(\alpha) &= \frac{1}{h_0/R + 1 - \cos \alpha} \left(\sin \alpha + \frac{\sin \alpha + \mu \cos \alpha}{1 - \mu g \alpha} \right) \\ \psi_2(\alpha) &= \frac{1}{h_0/R + 1 - \cos \alpha} \left(\frac{\sin \alpha + \mu \cos \alpha}{1 - \mu g \alpha} + \frac{\chi}{2} \cos \alpha \right) \sigma_e\end{aligned}\quad (2.13)$$

2.3 Напряженно-деформированное состояние слоя и силовые параметры технологического процесса

Для интегрирования уравнения (2.12) имеем граничное условие: $\alpha = 0, \sigma_y = 0$. Тогда решение уравнения запишется следующим образом:

$$\sigma_y = \exp\left(-\int_0^\alpha \psi_1 d\alpha\right) \int_0^\alpha \psi_2 \exp\left(\int_0^\alpha \psi_1 d\alpha\right) d\alpha \quad (2.14)$$

Для малых углов контакта, решение дифференциального уравнения (2.12) имеет вид:

$$\sigma_y = \frac{R}{h_0} \exp\left(-\frac{\mu R \alpha}{h_0}\right) \left[(1 + \mu^2) \int_0^\alpha \sigma_e \exp\left(\frac{\mu R \alpha}{h_0}\right) \alpha d\alpha + \left(\frac{\chi}{2} + \mu\right) \int_0^\alpha \sigma_e \exp\left(\frac{\mu R \alpha}{h_0}\right) d\alpha \right]. \quad (2.15)$$

Как видно из полученных решений, для вычисления напряжений необходимо описать состояние деформируемого материала. Примем уравнение состояния по теории упрочнения (2.4):

$$\sigma_e = a \xi_e^m \kappa^n,$$

где a, m, n – постоянные материала; ξ_e – эквивалентная скорость деформаций;

$$\kappa = \int_0^t \xi_e dt \text{ – параметр Удквиста.}$$

Скорость деформаций в продольном направлении, с учетом соотношений (2.7), вычисляется как:

$$\xi_y = \frac{dv_y}{dy} = \omega R \sin \alpha \frac{d\alpha}{dy}$$

В рассматриваемом случае плоского деформированного состояния эквивалентная скорость деформаций [24] $\xi_e = 2\xi_y/\sqrt{3}$. Если учтем, что (рис.2.2) $d\alpha/dy = dl/(Rdy) = 1/(R \cos \alpha)$, то для скорости деформаций и эквивалентной скорости деформации имеем:

$$\xi_y = \omega t g \alpha, \xi_e = 2\omega t g \alpha / \sqrt{3} \quad (2.17)$$

Тогда параметр Удквиста, с учетом второго равенства (2.17) и соотношения $dt = d\alpha/\omega$, примет вид:

$$\kappa = -\frac{2}{\sqrt{3}} \ln |\cos \alpha| \quad (2.18)$$

Если учесть формулы для эквивалентной деформации и параметра Удквиста в уравнении состояния (2.16), то для вычисления эквивалентного напряжения получим:

$$\sigma_e = a \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{m+n} \omega^m t g^m \alpha (-\ln |\cos \alpha|)^n \quad (2.19)$$

Из формулы (2.9), с учетом (2.10) и (2.19) определяем распределение давления на поверхности контакта материала с роликом

$$p = \frac{\sigma_y - \sigma_e}{1 - \mu t g \alpha} \quad (2.20)$$

С учетом первого уравнения (2.17) деформация в продольном направлении равняется:

$$\varepsilon_y = \int_0^t \xi_y dt + \varepsilon_y^0 = -\ln |\cos \alpha| + \varepsilon_y^0, \quad (2.21)$$

где ε_y^0 – остаточная деформация после наплавки.

Для того, чтобы полностью устранить остаточные продольные деформации необходимо выполнять условие $\ln |\cos \alpha| = \varepsilon_y^0$. Соответствующий угол контакта:

$$\alpha_0 = \arccos[\exp(\varepsilon_y^0)] . \quad (2.22)$$

С другой стороны, максимальный угол контакта (рис.2.1)

$$\alpha_0 = \arcsin\left[2\sqrt{\Delta h/(2R)}\right] , \quad (2.23)$$

где Δh – уменьшение толщины наплавленного слоя.

Сопоставляя выражения (2.22) и (2.23) находим:

$$\Delta h = R[1 - \exp(2\varepsilon_y^0)]/2 . \quad (2.24)$$

Если известна величина остаточной продольной сварочной деформации, то по формулам (2.22) и (2.24) определяются максимальный угол контакта материала с роликом и деформация $\varepsilon_z = \Delta h/h$ по толщине элемента в зоне прокатки шва.

После определения контактного давления и интенсивности сил трения можно подсчитать силу и момент, действующие на ролик.

Момент сил на единицу длины в направлении, перпендикулярном чертежу, в предположении, что моментом сил контактных давлений относительно центра ролика можно пренебречь, равен

$$M = \mu R^2 \int_0^{\alpha_0} p d\alpha .$$

Проекция на вертикальную ось силы, приходящейся на единицу длины в направлении перпендикулярном чертежу:

$$P_z = R \int_0^{\alpha_0} (p \cos \alpha - q \sin \alpha) d\alpha .$$

Проекция на горизонтальную ось силы, приходящейся на единицу длины в направлении перпендикулярном чертежу:

$$P_y = R \int_0^{\alpha_0} (p \sin \alpha + q \cos \alpha) d\alpha$$

2.4 Представление основных уравнений в безразмерной форме

В полученных выше формулах интегралы вычисляются численно. Для этого введем безразмерные величины:

$$\bar{\sigma}_e = \frac{\sigma_e}{a\omega^m}, \bar{\sigma}_{y,z} = \frac{\sigma_{y,z}}{a\omega^m}, \bar{p} = \frac{p}{a\omega^m}, \bar{M} = \frac{M}{a\omega^m R^2}, \bar{P}_{y,z} = \frac{P_{y,z}}{a\omega^m R}, \bar{q} = \frac{q}{a\omega^m}, \bar{v}_{y,z} = \frac{v_{y,z}}{\omega R},$$

$$\bar{\psi}_2(\alpha) = \psi_2(\alpha)/(a\omega^m), \bar{\xi}_{e,y} = \frac{\xi_{e,y}}{\omega}, \Delta\bar{h} = \frac{\Delta h}{R}, \lambda = \frac{h_0}{R}.$$

Приведенные выше основные уравнения в безразмерных величинах примут вид:

$$\bar{\psi}_2(\alpha) = \frac{1}{\lambda + 1 - \cos\alpha} \left(\frac{\sin\alpha + \mu \cos\alpha}{1 - \mu \operatorname{tg}\alpha} + \frac{\chi}{2} \cos\alpha \right) \bar{\sigma}_e,$$

$$\bar{\sigma}_y = \exp\left(-\int_0^\alpha \psi_1 d\alpha\right) \int_0^\alpha \bar{\psi}_2 \exp\left(\int_0^\alpha \psi_1 d\alpha\right) d\alpha,$$

$$\bar{\sigma}_y = \frac{1}{\lambda} \exp\left(-\frac{\mu\alpha}{\lambda}\right) \left[(1 + \mu^2) \int_0^\alpha \bar{\sigma}_e \exp\left(\frac{\mu\alpha}{\lambda}\right) d\alpha + \left(\frac{\chi}{2} + \mu\right) \int_0^\alpha \bar{\sigma}_e \exp\left(\frac{\mu\alpha}{\lambda}\right) d\alpha \right],$$

$$\bar{\xi}_y = \operatorname{tg}\alpha, \bar{\xi}_e = 2\operatorname{tg}\alpha/\sqrt{3},$$

$$\bar{p} = \frac{\bar{\sigma}_y - \bar{\sigma}_e}{1 - \mu \operatorname{tg}\alpha}, \quad \bar{\sigma}_e = \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{m+n} \operatorname{tg}^m \alpha (-\ln|\cos\alpha|)^n,$$

$$\Delta\bar{h} = [1 - \exp(2\varepsilon_y^0)]/2, \quad \alpha_0 = \arcsin\left[2\sqrt{\Delta\bar{h}/2}\right],$$

$$\bar{M} = \mu \int_0^{\alpha_0} \bar{p} d\alpha,$$

$$\bar{P}_z = \int_0^{\alpha_0} (\bar{p} \cos\alpha - \bar{q} \sin\alpha) d\alpha,$$

$$\bar{P}_y = \int_0^{\alpha_0} (\bar{p} \sin\alpha + \bar{q} \cos\alpha) d\alpha.$$

Таким образом, в одномерной постановке получены сравнительно общие формулы для расчета напряженно-деформированного состояния, давления и сил трения на поверхности контакта, усилий и моментов, действующих на ролик.

2.5 Численное решение одномерной задачи в системе Mathcad и анализ результатов

Для численного расчета была составлена программа в системе Mathcad которая приведена в приложении.

В качестве примера был проведен расчет деформирования материала для следующих значений постоянных: $m = 0,147$; $n = 0,157$; $\mu = 0,3$; $\chi = 1$; $h_0 / R = 0,1$. Величина остаточной деформации после наплавки принималась $\varepsilon_y^0 = -8,7 \cdot 10^{-3}$ [61]. Величина $\Delta h / R = 8,7 \times 10^{-3}$. На рис.2.3 показаны распределения безразмерных величин компонентов напряжения и эквивалентного напряжения в очаге деформации. Как видно из рис.2.3, в осевом направлении напряжения положительны, поэтому остаточные растягивающие напряжения после сварки, будут увеличиваться при обкатке шва.

На рис 2.4 показано изменение остаточной деформации в продольном направлении а на рис.2.5 - распределение безразмерной величины контактного давления. Величины силовых факторов действующих на ролик равны: $\bar{P}_y = 4.1 \times 10^{-3}$, $\bar{P}_z = 0.011$, $\bar{M} = 3.4 \times 10^{-3}$. На рис.2.6 даны графики изменения безразмерных значений сил и момента в зависимости от угла контакта. По этим графикам можно установить значения силы и момента деформирования и определить требуемую мощность технологического оборудования.

Расчеты показывают, что можно подобрать параметры μ и λ так, чтобы существенно уменьшить напряжения в направлении оси y (рис.2.7). При определенных значениях λ , силы трения q меняют направление на малом участке поверхности контакта.

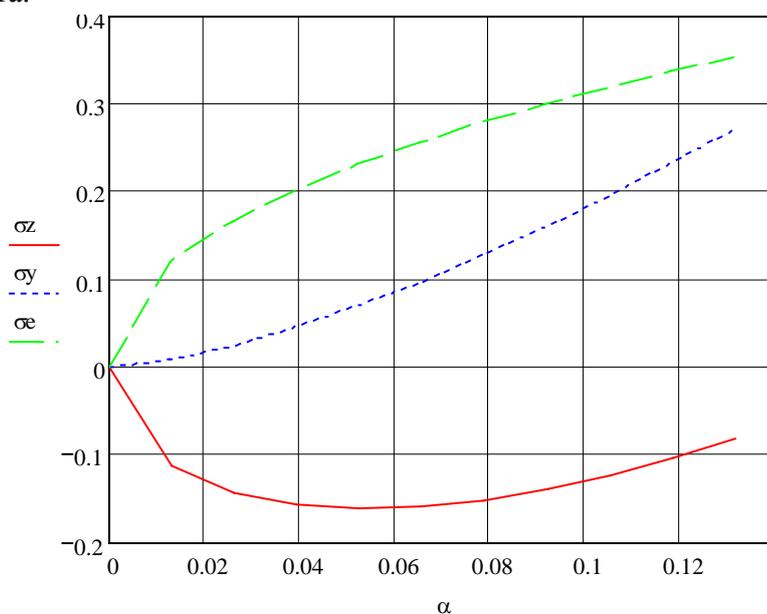


Рис.2.3 Распределение компонентов напряжений и эквивалентного напряжения в очаге деформации

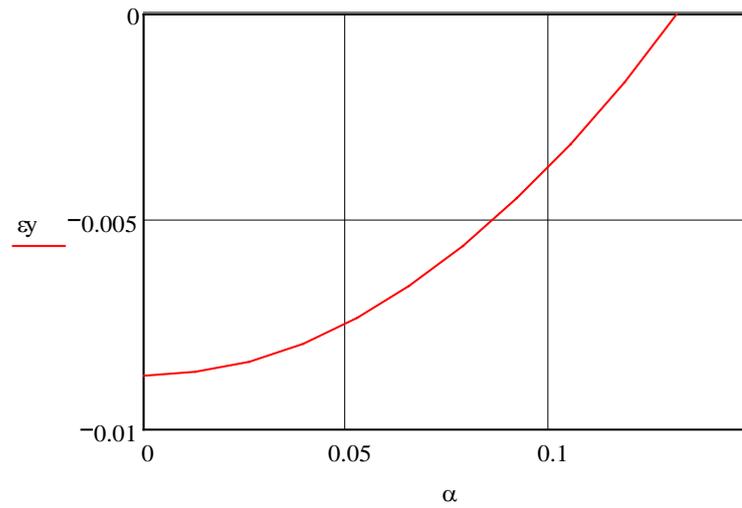


Рис.2.4. Изменение остаточной деформаций
в осевом направлении слоя

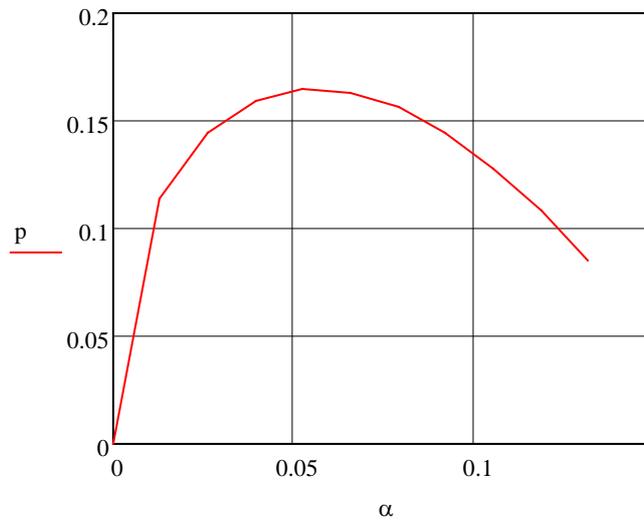


Рис.2.5 Распределение контактного
давления на ролик

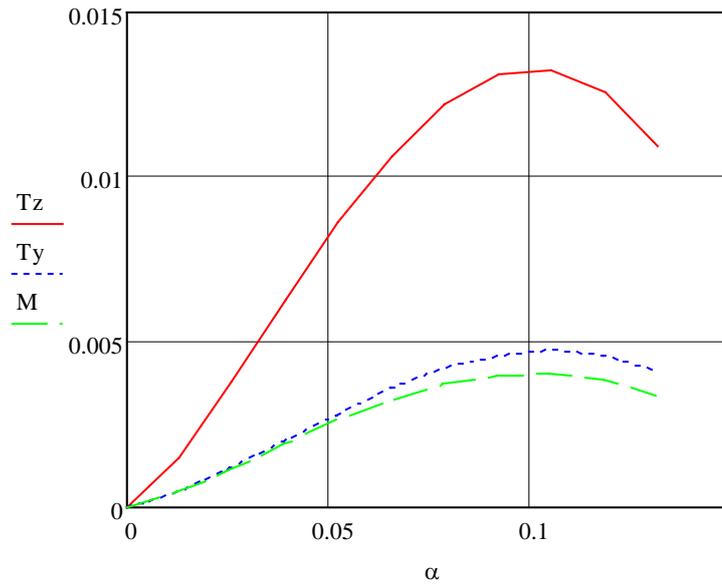


Рис.2.6 Силы и момент, действующие на ролик

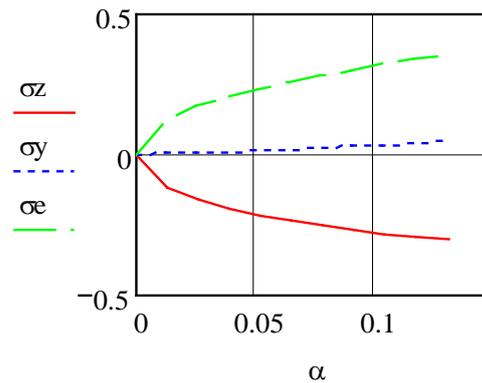


Рис.2.7 Распределение компонентов напряжений и эквивалентного напряжения в очаге деформации для значений $\mu = 0,3$; $\lambda = 0,5$.

Был проведен расчет напряженно-деформированного состояния на основе модели нелинейно-вязкого тела. Модель нелинейно-вязкого тела описывает кривые ползучести при отсутствии первого участка, т.е. когда деформационное упрочнение несущественно. При высоких температурах, для любых напряжений и скоростей деформации затухающий участок на кривых ползучести обычно отсутствует [45,46]. При наличии линейных начальных участков в уравнении (2.1) нужно положить $\beta = 0$ и кривые ползучести

будут описываться моделью нелинейно-вязкого тела, которую широко используют для расчетов процессов формоизменения в условиях сверхпластичности.

Численные расчеты были проведены для следующих значений постоянных материала в уравнении состояния (2.3) $m = 0,149; n = 0$. На рис.2.8 представлены графики компонентов напряжений и эквивалентного напряжения в очаге деформации. На рис.2.9 представлен график изменения давления на ролик. Если сравнить с результатом расчета по теории упрочнения (рис.2.5), то можно заметить, что давление резко уменьшается фактически до нуля (рис.2.9) в конце участка контакта, а максимальное значение достигается при значительно меньшем угле контакта, чем это имеет место по теории упрочнения. Значит, основное сопротивление со стороны материала на ролик приходит в начале контакта, а затем резко уменьшается. Аналогичная закономерность наблюдается и для силовых параметров технологического процесса, представленных на рис.2.10, если сравнить их с результатами расчета по теории упрочнения (рис.2.6).

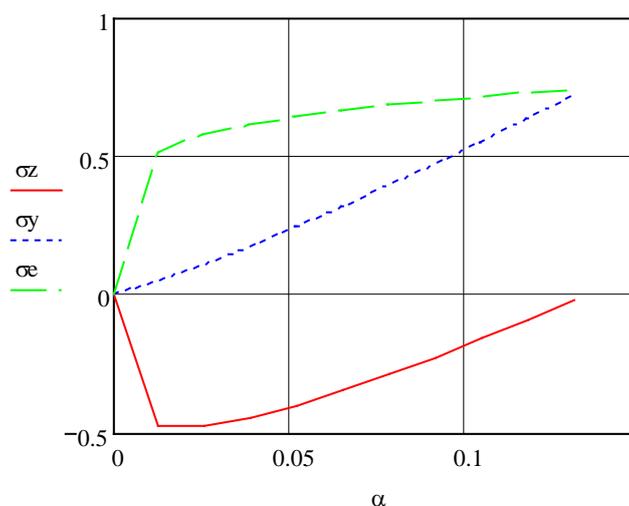


Рис.2.8 Распределение компонентов напряжений и эквивалентного напряжения в очаге деформации для нелинейно-вязкого материала ($m = 0,149; n = 0$)

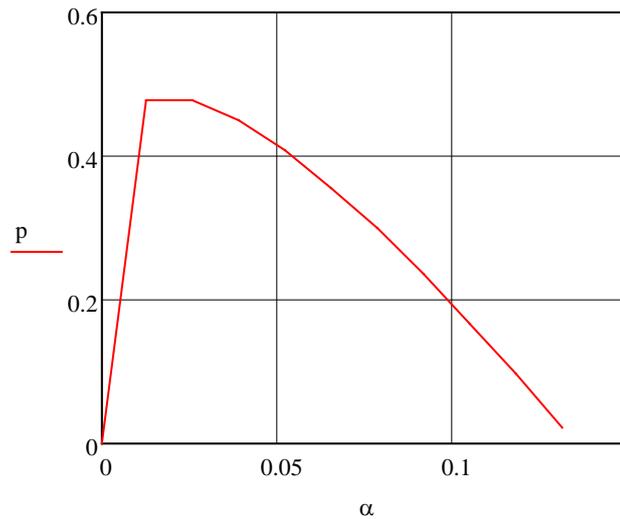


Рис.2.9 Распределение контактного давления на ролик для нелинейно-вязкого материала ($m = 0,149; n = 0$)

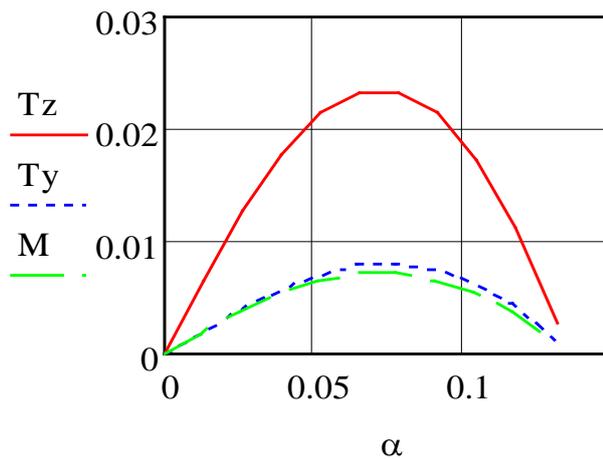


Рис.2.10 Силы и момент, действующие на ролик для нелинейно-вязкого материала ($m = 0,149; n = 0$)

Полученные результаты и проведенный анализ весьма важен для установления режима термомеханической обработки и подбора технологического оборудования.

3. ПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ НАПЛАВЛЕННОГО СЛОЯ НА ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ. ДВУМЕРНАЯ ЗАДАЧА

Решение одномерной задачи приближенно описывает деформирование материала. Для более точного описания напряженно-деформированного состояния слоя в очаге деформации необходимо решить двумерную задачу с учетом реальных свойств металла при повышенных температурах. Основные уравнения двумерной задачи приведены в работе [25].

3.1 Постановка двумерной задачи

Рассмотрим деформирование материала под действием абсолютно жесткого цилиндрического тела (ролика), которое совершает плоскопараллельное движение. Деформируемый материал находится на жесткой поверхности. Скорость перемещения центра ролика обозначим через v_0 , а угловую скорость вращения – через ω . Считается, что они постоянные во времени величины. Примем прямоугольную систему координат x, y, z . Рассматривается плоское деформированное состояние и считается, что напряженно-деформированное состояние не зависит от координаты y . Компоненты скоростей перемещений точки в очаге деформации:

$$v_z = v_z(x, z), v_x = v_x(x, z), v_y = 0. \quad (3.1)$$

Компоненты тензора напряжений $\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(x, z); i, j = x, y, z; \tau_{zy} = 0, \tau_{xy} = 0$. За полные деформации примем деформации ползучести.

Уравнение состояния материала выбираем на основе теории упрочнения (2.4). Постоянные материала, обычно, определяются путем обработки кривых ползучести. Из уравнения (2.4), как частный случай ($n = 0$) получается модель нелинейно-вязкого тела:

$$\sigma_e = a \zeta_e^m, \quad (3.2)$$

или модель пластического материала ($m = 0, n \neq 0$) с нелинейным упрочнением.

Компоненты скоростей деформаций в рассматриваемом случае вычисляются по формулам [46]:

$$\xi_x = \partial v_x / \partial x, \xi_z = \partial v_z / \partial z, \xi_y = 0, \eta_{xz} = \partial v_x / \partial z + \partial v_z / \partial x . \quad (3.3)$$

Условие несжимаемости материала имеет вид: $\xi_x + \xi_z = 0$, или в скоростях перемещений, с учетом зависимостей (3.3):

$$\partial v_x / \partial x + \partial v_z / \partial z = 0 . \quad (3.4)$$

В таком случае, эквивалентная скорость деформации и параметр Удквиста равняются :

$$\xi_e = 2/\sqrt{3} \sqrt{(\partial v_x / \partial x)^2 + (\partial v_x / \partial z + \partial v_z / \partial x)^2 / 4} , \quad (3.5)$$

$$\kappa = \int \xi_e / v_x dx . \quad (3.6)$$

Компоненты тензора напряжений вычисляются зависимостями Сен-Венана-Леви-Мизеса [46]:

$$\sigma_{ij} = \sigma_0 \delta_{ij} + 2\sigma_e \xi_{ij} / (3\xi_e) , \quad (3.7)$$

где: σ_0 – среднее напряжение, $\sigma_0 = \sigma_{ii} / 3$; δ_{ij} – символ Кронекера.

В рассматриваемом случае из формул (3.3), (3.7) легко установить, что $\sigma_y = \sigma_0$; и следовательно $\sigma_0 = (\sigma_x + \sigma_z) / 2$.

Дифференциальные уравнения равновесия в рассматриваемом случае плоского деформированного состояния имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \quad (3.8)$$

Компоненты тензора напряжений, согласно формуле (3.7) вычисляются соотношениями:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_0 + \frac{2}{3} \frac{\sigma_e}{\xi_e} \frac{\partial v_x}{\partial x}, \sigma_z = \sigma_0 + \frac{2}{3} \frac{\sigma_e}{\xi_e} \frac{\partial v_z}{\partial z} = \sigma_0 - \frac{2}{3} \frac{\sigma_e}{\xi_e} \frac{\partial v_x}{\partial x}, \sigma_y = \sigma_0, \\ \tau_{zx} &= \frac{1}{3} \frac{\sigma_e}{\xi_e} \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (3.9)$$

Подставляя формулы (3.9) в дифференциальные уравнения (3.8), получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_0}{\partial x} + \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\sigma_e}{\xi_e} \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\sigma_e}{\xi_e} \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \right] &= 0 \\ \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\sigma_e}{\xi_e} \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial \sigma_0}{\partial z} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\sigma_e}{\xi_e} \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) &= 0 \end{aligned} \quad (3.10)$$

Исключим из уравнений (3.10) среднее напряжение σ_0 . Тогда дифференциальные уравнения равновесия после несложных преобразований примут вид:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(\frac{\sigma_e}{\xi_e} \right) + \frac{\sigma_e}{\xi_e} \left(\frac{\partial^3 v_x}{\partial z^3} + \frac{\partial^3 v_z}{\partial x \partial z^2} - \frac{\partial^3 v_x}{\partial x^2 \partial z} - \frac{\partial^3 v_z}{\partial x^3} + 4 \frac{\partial^3 v_x}{\partial z \partial x^2} \right) - \\ \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{\sigma_e}{\xi_e} \right) + 4 \frac{\partial^2}{\partial z \partial x} \left(\frac{\sigma_e}{\xi_e} \right) \frac{\partial v_x}{\partial x} = 0 \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_0}{\partial x} + \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\sigma_e}{\xi_e} \right) \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{1}{3} \frac{\sigma_e}{\xi_e} \left(2 \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial x \partial z} \right) + \\ + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\sigma_e}{\xi_e} \right) \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) = 0 \end{aligned} \quad (3.12)$$

Уравнения (3.11), (3.12), с учетом уравнения состояния (2.4), зависимостей (3.5) и (3.6) являются нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных относительно скоростей перемещений и среднего нормального напряжения.

Для интегрирования дифференциальных уравнений имеем граничные условия:

$$z = 0, v_z = 0; v_x = 0 \quad (3.13)$$

На поверхности контакта материала с роликом скорости перемещения равняются:

$$(z, x) \in L; v_z = \omega R \sin \alpha, v_x = v_0 - \omega R \cos \alpha \quad (3.14)$$

где L - дуга окружности с центральным углом α_0 , $0 \leq \alpha \leq \alpha_0$; R - радиус ролика.

На боковых поверхностях $x = 0, x = a$ имеем условие, равенство нулю суммарной силы в направлении оси x ,

$$\int \sigma_x dz = 0 \quad (3.15)$$

Решение дифференциальных уравнений с частными производными в ряде случаев может быть проведено аналитическими методами. Это относится в основном к некоторым уравнениям первого порядка, а также к уравнениям второго порядка с постоянными коэффициентами. Аналитические методы полезны не только тем, что дают возможность получать общие решения, которые могут быть использованы многократно. Они имеют также огромное значение для построения численных методов. Проверка разностных схем на известных решениях простейших уравнений позволяет оценить эти схемы, выяснить их сильные и слабые стороны.

Интегрирование нелинейных дифференциальных уравнений с частными производными (3.11), (3.12) с граничными условиями (3.13), (3.14) и (3.15) необходимо вести численными методами. Широко распространенными являются разностные методы. Они основаны на введении некоторой разностной сетки в рассматриваемой области, например методом конечных разностей с использованием итерационного процесса. Задаем нулевое приближение для скорости перемещения v_z (или v_x), из условия несжимаемости определяем скорость перемещения v_x (или v_z), определяем эквивалентную скорость деформации, параметр Удквиста и из уравнений равновесия находим среднее нормальное напряжение и скорость перемещения v_z (или v_x). Сравниваем заданное и полученное значения скорости перемещения на каждом шаге итерации.

3.2 Численное решение дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных разностей

Для численного решения задачи введем безразмерные величины (h_0 - высота наплавленного слоя до деформации):

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{a\omega^m}, \bar{\sigma}_e = \frac{\sigma_e}{a\omega^m}, \bar{v}_x = \frac{v_x}{\omega R}, \bar{v}_z = \frac{v_z}{\omega R}, \bar{x} = \frac{x}{h_0}, \bar{z} = \frac{z}{h_0}, \bar{\xi}_{ij} = \frac{\xi_{ij}}{\omega}, \lambda = \frac{h_0}{R}, \bar{v}_0 = \frac{v_0}{\omega R}.$$

Компоненты скоростей деформации (3.3), эквивалентная скорость деформации (3.5), параметр Удквиста (3.6) и уравнение состояния (2.4) в безразмерных величинах имеют вид:

$$\bar{\xi}_x = \frac{1}{\lambda} \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{x}}, \bar{\xi}_z = \frac{1}{\lambda} \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \bar{z}}, \bar{\eta}_{xz} = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \bar{x}} \right), \quad (3.16)$$

$$\bar{\xi}_e = 2/(\lambda\sqrt{3}) \sqrt{(\partial \bar{v}_x / \partial \bar{x})^2 + (\partial \bar{v}_x / \partial \bar{z} + \partial \bar{v}_z / \partial \bar{x})^2 / 4},$$

$$\bar{\kappa} = \lambda \int \bar{\xi}_e / \bar{v}_x d\bar{x}, \quad \bar{\sigma}_e = \bar{\xi}_e^m \bar{\kappa}^n.$$

Используя приведенные выше безразмерные величины, уравнения равновесия (3.11) и (3.12) примут вид:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \bar{x}} \right) \left[\frac{\partial^2}{\partial \bar{z}^2} \left(\frac{\bar{\sigma}_e}{\bar{\xi}_e} \right) - \frac{\partial^2}{\partial \bar{x}^2} \left(\frac{\bar{\sigma}_e}{\bar{\xi}_e} \right) \right] + 4 \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{x}} \frac{\partial^2}{\partial \bar{z} \partial \bar{x}} \left(\frac{\bar{\sigma}_e}{\bar{\xi}_e} \right) + \frac{\bar{\sigma}_e}{\bar{\xi}_e} \left(\frac{\partial^3 \bar{v}_x}{\partial \bar{z}^3} + \frac{\partial^3 \bar{v}_z}{\partial \bar{x} \partial \bar{z}^2} - \right. \\ & \left. \frac{\partial^3 \bar{v}_z}{\partial \bar{x}^3} + 3 \frac{\partial^3 \bar{v}_x}{\partial \bar{z} \partial \bar{x}^2} \right) = 0 \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \bar{\sigma}_0}{\partial \bar{x}} + \frac{2R}{3h_0} \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left(\frac{\bar{\sigma}_e}{\bar{\xi}_e} \right) \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{x}} + \frac{1R}{3h_0} \frac{\bar{\sigma}_e}{\bar{\xi}_e} \left(2 \frac{\partial^2 \bar{v}_x}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}_x}{\partial \bar{z}^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}_z}{\partial \bar{x} \partial \bar{z}} \right) + \\ & + \frac{1R}{3h_0} \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left(\frac{\bar{\sigma}_e}{\bar{\xi}_e} \right) \left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \bar{x}} \right) = 0 \end{aligned} \quad (3.18)$$

Граничные условия в безразмерном виде примут вид:

$$\bar{z} = 0, \bar{v}_z = 0; \bar{v}_x = 0, \quad (3.19)$$

$$(\bar{z}, \bar{x}) \in L; \bar{v}_z = \sin \alpha, \bar{v}_x = \bar{v}_0 - \cos \alpha.$$

На боковых поверхностях $\bar{x} = 0, \bar{x} = a/h_0$ имеем условие - равенство нулю суммарной силы в направлении оси \bar{x} ,

$$\int \bar{\sigma}_x d\bar{z} = 0. \quad (3.20)$$

Введем обозначение $\psi = \bar{\sigma}_e / \bar{\xi}_e$. Используя соотношения (3.16) для функции ψ имеем:

$$\psi = \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{m+n-1} \lambda^{1-m} \left[\left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{x}} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \bar{x}} \right)^2 \right]^{\frac{m-1}{2}} \left\{ \int \left[\left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{x}} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \bar{x}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} / \bar{v}_x d\bar{x} \right\}^n. \quad (3.21)$$

Для вычисления интеграла в правой части уравнения (3.21) введем обозначение:

$$\varphi(\bar{x}, \bar{z}) = \int \left[\left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{x}} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \bar{x}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} / \bar{v}_x d\bar{x} . \quad (3.22)$$

Для функции $\varphi(\bar{x}, \bar{z})$ имеем дифференциальное уравнение:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \bar{x}} = \left[\left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{x}} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \bar{x}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} / \bar{v}_x . \quad (3.23)$$

С учетом выражения (3.22), функция ψ принимает вид:

$$\psi = \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{m+n-1} \lambda^{1-m} \left[\left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{x}} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \bar{x}} \right)^2 \right]^{\frac{m-1}{2}} \varphi^n(\bar{x}, \bar{z}) . \quad (3.24)$$

Используя приведенные выше обозначения, дифференциальные уравнения (3.17) и (3.18) запишем в форме:

$$\left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \bar{x}} \right) \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial \bar{z}^2} - \frac{\partial^2 \psi}{\partial \bar{x}^2} \right) + 4 \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{x}} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \bar{z} \partial \bar{x}} + \psi \left(\frac{\partial^3 \bar{v}_x}{\partial \bar{z}^3} + \frac{\partial^3 \bar{v}_z}{\partial \bar{x} \partial \bar{z}^2} - \frac{\partial^3 \bar{v}_z}{\partial \bar{x}^3} + 3 \frac{\partial^3 \bar{v}_x}{\partial \bar{z} \partial \bar{x}^2} \right) = 0 . \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial \bar{\sigma}_0}{\partial \bar{x}} + \frac{2}{3\lambda} \frac{\partial \psi}{\partial \bar{x}} \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{x}} + \frac{1}{3\lambda} \psi \left(2 \frac{\partial^2 \bar{v}_x}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}_x}{\partial \bar{z}^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}_z}{\partial \bar{x} \partial \bar{z}} \right) + \frac{1}{3\lambda} \frac{\partial \psi}{\partial \bar{z}} \left(\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{z}} + \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \bar{x}} \right) = 0 \quad (3.26)$$

Среди численных методов решения нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных широко распространенными являются разностные методы [12,68]. Они основаны на введении некоторой разностной сетки в рассматриваемой области. Значения производных, граничные условия выражаются через значения функций в узлах сетки, в результате чего получается система алгебраических уравнений. Решая эту систему уравнений, можно найти в узлах сетки значения сеточных функций, которые приближенно считаются равными значениям искомых функций.

3.3 Построение разностной схемы

Построение разностной схемы решения дифференциальных уравнений в частных производных (3.25), (3.26) основано на введении сетки в рассматриваемом пространстве (рис.3.1). Узлы сетки являются расчетными точками. Узлы сетки, лежащие на границе области, называются граничными узлами. Все остальные узлы - внутренними. Часто, при

где ρ_1 - расстояние от точки 0 до точки 1 на границе L, в которой берутся заданные значения скоростей перемещений v_x и v_z , $\rho_2 = \Delta z$ - расстояние между точками 0 и 2, которое равняется шагу деления, $v_{x0}, v_{z0}, v_{x2}, v_{z2}$ - неизвестные скорости перемещений в точках 0 и 2.

Аналогичные формулам (3.27) формулы линейной интерполяции можно записать для фиктивных узлов за криволинейной границей L.

В ряде случаев вводят неравномерную сетку. В частности, необходимо проводить сгущение узлов для более точного расчета в некоторых частях рассматриваемой области. При этом области сгущения узлов либо известны заранее, либо определяются в процессе решения задачи (например, в зависимости от градиента искомым функций) [12].

Для одного и того же уравнения можно построить различные разностные схемы. Для построения разностной схемы частные производные в дифференциальных уравнениях (3.25) и (3.26) заменим конечно-разностными соотношениями по некоторому шаблону (рис.3.2), например, используя центральную разностную схему.

Введем равномерную прямоугольную сетку с помощью координатных линий $\bar{x}_i = i \cdot \Delta \bar{x} (i = 1, 2, \dots, m); \bar{z}_j = j \cdot \Delta \bar{z} (j = 1, 2, \dots, n)$. Прямоугольные сетки наиболее удобны при организации вычислительного алгоритма. Заменим частные производные конечно-разностными аналогами:

$i-1, j+1$	$i, j+1$	$i+1, j+1$
$i-1, j$	i, j	$i+1, j$
$i-1, j-1$	$i, j-1$	$i+1, j-1$

Рис.3.2 Шаблон

$$\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{x}} = \frac{\bar{v}_{xi+1,j} - \bar{v}_{xi-1,j}}{2\Delta \bar{x}}, \quad \frac{\partial^2 \bar{v}_x}{\partial \bar{x}^2} = \frac{\bar{v}_{xi+1,j} - 2\bar{v}_{xi,j} + \bar{v}_{xi-1,j}}{\Delta \bar{x}^2},$$

$$\frac{\partial \bar{v}_x}{\partial \bar{z}} = \frac{\bar{v}_{xi,j+1} - \bar{v}_{xi,j-1}}{2\Delta \bar{z}}, \quad \frac{\partial^3 \bar{v}_x}{\partial \bar{z}^3} = \frac{\bar{v}_{xi,j+2} - 2\bar{v}_{xi,j+1} + 2\bar{v}_{xi,j-1} - \bar{v}_{xi,j-2}}{2\Delta \bar{z}^3},$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^3 \bar{v}_z}{\partial \bar{x} \partial \bar{z}^2} &= \frac{1}{2\Delta \bar{x} \Delta \bar{z}^2} (\bar{v}_{zi+1,j+1} - \bar{v}_{zi-1,j+1} - 2\bar{v}_{zi+1,j} + 2\bar{v}_{zi-1,j} + \bar{v}_{zi+1,j-1} - \bar{v}_{zi-1,j-1}), \\
\frac{\partial^3 \bar{v}_x}{\partial \bar{x}^2 \partial \bar{z}} &= \frac{1}{2\Delta \bar{x}^2 \Delta \bar{z}} (\bar{v}_{xi+1,j+1} - \bar{v}_{xi+1,j-1} - 2\bar{v}_{xi,j+1} + 2\bar{v}_{xi,j-1} + \bar{v}_{xi-1,j+1} - \bar{v}_{xi-1,j-1}), \\
\frac{\partial^3 \bar{v}_z}{\partial \bar{x}^3} &= \frac{1}{2\Delta \bar{x}^3} (\bar{v}_{zi+2,j} - 2\bar{v}_{zi+1,j} + 2\bar{v}_{zi-1,j} - \bar{v}_{zi-2,j}), \\
\frac{\partial \bar{v}_z}{\partial \bar{x}} &= \frac{\bar{v}_{zi+1,j} - \bar{v}_{zi-1,j}}{2\Delta \bar{x}}, \\
\frac{\partial \psi}{\partial \bar{x}} &= \frac{\psi_{i+1,j} - \psi_{i-1,j}}{2\Delta \bar{x}}, \quad \frac{\partial^2 \psi}{\partial \bar{x}^2} = \frac{\psi_{i+1,j} - 2\psi_{i,j} + \psi_{i-1,j}}{\Delta \bar{x}^2}, \\
\frac{\partial \psi}{\partial \bar{z}} &= \frac{\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j-1}}{2\Delta \bar{z}}, \quad \frac{\partial^2 \psi}{\partial \bar{z}^2} = \frac{\psi_{i,j+1} - 2\psi_{i,j} + \psi_{i,j-1}}{\Delta \bar{z}^2}, \\
\frac{\partial^2 \psi}{\partial \bar{x} \partial \bar{z}} &= \frac{1}{4\Delta \bar{x} \Delta \bar{z}} (\psi_{i+1,j+1} - \psi_{i+1,j-1} - \psi_{i-1,j+1} + \psi_{i-1,j-1})
\end{aligned} \tag{3.28}$$

Используя соотношения (3.28) уравнения (3.23), (3.24), (3.25) и (3.26) в конечных разностях принимают вид:

$$\begin{aligned}
\varphi_{i,j} &= \varphi_{i-1,j} + \Delta \bar{x} \left[\left(\frac{\bar{v}_{xi+1,j} - \bar{v}_{xi-1,j}}{2\Delta \bar{x}} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\bar{v}_{xi,j+1} - \bar{v}_{xi,j-1}}{2\Delta \bar{z}} + \frac{\bar{v}_{zi+1,j} - \bar{v}_{zi-1,j}}{2\Delta \bar{x}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} / \bar{v}_{xi,j}, \\
\psi_{i,j} &= \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{m+n-1} \lambda^{1-m} \left[\left(\frac{\bar{v}_{xi+1,j} - \bar{v}_{xi-1,j}}{2\Delta \bar{x}} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\bar{v}_{xi,j+1} - \bar{v}_{xi,j-1}}{2\Delta \bar{z}} + \frac{\bar{v}_{zi+1,j} - \bar{v}_{zi-1,j}}{2\Delta \bar{x}} \right)^2 \right]^{\frac{m-1}{2}} \varphi_{i,j}^n, \\
\bar{v}_{xi,j} &= \left\{ \frac{\bar{\sigma}_{0i+1,j} - \bar{\sigma}_{0i-1,j}}{2\Delta \bar{x}} + \frac{1}{6\lambda \Delta \bar{x}^2} (\psi_{i+1,j} - \psi_{i-1,j}) (\bar{v}_{xi+1,j} - \bar{v}_{xi-1,j}) + \frac{\psi_{i,j}}{3\lambda} \left[2 \frac{\bar{v}_{xi+1,j} + \bar{v}_{xi-1,j}}{\Delta \bar{x}^2} + \right. \right. \\
&\quad \left. \frac{\bar{v}_{xi,j+1} + \bar{v}_{xi,j-1}}{\Delta \bar{z}^2} + \frac{1}{4\Delta \bar{x} \Delta \bar{z}} (\bar{v}_{zi+1,j+1} - \bar{v}_{zi-1,j+1} - \bar{v}_{zi+1,j-1} + \bar{v}_{zi-1,j-1}) \right] + \\
&\quad \left. \frac{1}{12\lambda} \frac{\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j-1}}{\Delta \bar{z}} \left(\frac{\bar{v}_{xi,j+1} - \bar{v}_{xi,j-1}}{\Delta \bar{z}} + \frac{\bar{v}_{zi+1,j} - \bar{v}_{zi-1,j}}{\Delta \bar{x}} \right) \right\} / \left[\frac{2}{3\lambda} \psi_{i,j} \left(\frac{2}{\Delta \bar{x}^2} + \frac{1}{\Delta \bar{z}^2} \right) \right]
\end{aligned} \tag{3.29}$$

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{\bar{v}_{xi,j+1} - \bar{v}_{xi,j-1}}{2\Delta\bar{z}} + \frac{\bar{v}_{zi+1,j} - \bar{v}_{zi-1,j}}{2\Delta\bar{x}} \right) \left(\frac{\psi_{i,j+1} - 2\psi_{i,j} + \psi_{i,j-1}}{\Delta\bar{z}^2} - \frac{\psi_{i+1,j} - 2\psi_{i,j} + \psi_{i-1,j}}{\Delta\bar{x}^2} \right) + \\
& \frac{1}{2\Delta\bar{x}^2\Delta\bar{z}} (\bar{v}_{xi+1,j} - \bar{v}_{xi-1,j}) (\psi_{i+1,j+1} - \psi_{i+1,j-1} - \psi_{i-1,j+1} + \psi_{i-1,j-1}) + \\
& \psi_{i,j} \left[\frac{\bar{v}_{xi,j+2} - 2\bar{v}_{xi,j+1} + 2\bar{v}_{xi,j-1} - \bar{v}_{xi,j-2}}{2\Delta\bar{z}^3} - \frac{\bar{v}_{zi+2,j} - 2\bar{v}_{zi+1,j} + 2\bar{v}_{zi-1,j} - \bar{v}_{zi-2,j}}{2\Delta\bar{x}^3} + \right. \\
& \left. \frac{\bar{v}_{zi+1,j+1} - \bar{v}_{zi-1,j+1} - 2\bar{v}_{zi+1,j} + 2\bar{v}_{zi-1,j} + \bar{v}_{zi+1,j-1} - \bar{v}_{zi-1,j-1}}{2\Delta\bar{x}\Delta\bar{z}^2} + \frac{3}{2\Delta\bar{x}^2\Delta\bar{z}} (\bar{v}_{xi+1,j+1} - \bar{v}_{xi+1,j-1} - \right. \\
& \left. 2\bar{v}_{xi,j+1} + 2\bar{v}_{xi,j-1} + \bar{v}_{xi-1,j+1} - \bar{v}_{xi-1,j-1}) \right] = 0
\end{aligned}$$

Граничные условия: $\bar{v}_{xi,j} = 0; \bar{v}_{zi,j} = 0; (i = 1, 2, \dots, m; j = 1)$,

$$\bar{v}_{xi,j} = \bar{v}_0 - \cos \alpha_i, \bar{v}_{zi,j} = \sin \alpha_i; (i, j \in L),$$

$$\int \sigma_x dl = 0; (i = 1, j \in [1, \dots, n])$$

3.4 Сходимость, аппроксимация, устойчивость

разностной схемы

Исходную дифференциальную задачу, состоящую в решении уравнения с частными производными при заданных граничных условиях, запишем в операторном виде [68]:

$$HV(x, z) = F(x, z), (x, z) \in \bar{G} \quad (3.30)$$

Заметим, что это операторное уравнение включает не только исходное уравнение с частными производными, но и дополнительные условия (граничные условия). Функция $F(x, z)$ описывает правые части уравнения, а также граничные условия. Область \bar{G} включает расчетную область G и границу Γ .

Дифференциальную задачу (3.30) заменяем разностной задачей относительно сеточной функции v , определенной в узлах сетки \bar{g}_Δ . Для простоты будем считать сетку зависящей от одного параметра Δ . Разностную задачу можно также записать в операторном виде:

$$H_\Delta v_\Delta = f_\Delta, (x, z) \in \bar{g}_\Delta \quad (3.31)$$

Значения сеточной функции v_{ij} в узлах сетки $(x_i, z_j) \in \bar{g}_\Delta$ приближенно заменяют значения искомой функции $V_{ij} = V(x_i, z_j)$ в тех же узлах с погрешностями

$$\delta v_{ij} = v_{ij} - V_{ij}. \quad (3.32)$$

Введем некоторое характерное значение этих погрешностей, например их максимальное по модулю значение на сетке

$$\delta v = \max |\delta v_{ij}|. \quad (3.33)$$

Разностная схема (3.31) называется сходящейся, если при сгущении узлов сетки это значение погрешности стремится к нулю, т.е. если

$$\lim \delta v = 0 \text{ при } \Delta \rightarrow 0. \quad (3.34)$$

Если при этом $\delta v \leq M\Delta^k$, где $M = \text{const} > 0$, то разностная схема имеет k -й порядок точности. Говорят также, что она сходится со скоростью $O(\Delta^k)$.

Порядок точности схемы при наличии нескольких независимых переменных можно также оценивать по значениям шагов. В частности, при выполнении условия $\delta v \leq M(\Delta_x^p + \Delta_z^q)$, разностная схема сходится со скоростью $O(\Delta_x^p + \Delta_z^q)$ и имеет p -й порядок точности по Δ_x и q -й порядок по z .

Запишем уравнение (3.31) для погрешности решения на сетке: $\delta v_\Delta = v_\Delta - V_\Delta$. Отсюда найдем $v_\Delta = V_\Delta + \delta v_\Delta$. Подставляя это значение v_Δ в разностное уравнение (3.31), получаем:

$$H_\Delta \delta v_\Delta = w_\Delta, w_\Delta = f_\Delta - H_\Delta V_\Delta. \quad (3.35)$$

Величина w_Δ называется невязкой (погрешностью аппроксимации) разностной схемы. Введем некоторую характерную величину невязки w , например

$$w = \max |w_\Delta|, \quad (x, z) \in \bar{g}_\Delta. \quad (3.36)$$

Тогда? при $w = O(\Delta^k)$, аппроксимации имеет k -й порядок относительно Δ . Если значения Δ_x и Δ_z независимы, то при $w = O(\Delta_x^p + \Delta_z^q)$ порядок аппроксимации разностной схемы p -й порядок точности по координате x и q -й порядок по координате z .

Разностная схема (3.31) аппроксимирует исходную дифференциальную задачу (3.30), если при измельчении сетки невязка стремится к нулю, т.е. если

$$\lim w = 0 \quad \text{при} \quad \Delta_x \rightarrow 0, \Delta_z \rightarrow 0 . \quad (3.37)$$

Аппроксимация такого типа, когда невязка стремится к нулю при стремлении к нулю Δ_x и Δ_z по любому закону без каких-либо условий, называется безусловной или абсолютной аппроксимацией. В случае условной аппроксимации накладываются некоторые условия на размеры шагов по пространству.

Разностная схема (3.31) устойчива, если ее решение непрерывно зависит от входных данных, т.е. малому изменению входных данных соответствует малое изменение решения. Устойчивость характеризует чувствительность разностной схемы к различного рода погрешностям, она является внутренним свойством разностной задачи, и это свойство не связывается непосредственно с исходной дифференциальной задачей (в отличие от сходимости аппроксимации).

По аналогии с аппроксимацией устойчивость бывает условной и безусловной в зависимости от того, накладываются или нет ограничения на соотношения между шагами по разным переменным.

В теории разностных схем рассматриваются разные способы исследования аппроксимации исходной дифференциальной задачи разностной, и проверки устойчивости разностных схем. Эти исследования значительно проще, чем доказательство сходимости разностного решения к точному. Поэтому пользуются следующим утверждением [68]: если решение исходной дифференциальной задачи (3.30) существует, а разностная схема (3.31) устойчива и аппроксимирует задачу (3.30) на данном решении, то разностное решение сходится к точному. Короче говоря, из аппроксимации и устойчивости следует сходимость.

Оценки устойчивости и сходимости разностных схем можно провести путем измельчения сетки ($\Delta_x \rightarrow 0, \Delta_z \rightarrow 0$). Однако это приводит к существенному увеличению объема вычислений и возрастанию суммарных погрешностей.

Практика использования численных методов для решения инженерных задач на компьютере показывает, что применение той или иной разностной схемы, даже если она исследована теоретически, требует еще тщательной апробации при решении конкретной задачи. Для этого проводятся методические вычислительные эксперименты, состоящие в расчетах с разными значениями шагов при разных исходных данных. Полезно также отладить методику с помощью тестовых задач, для которых либо удастся получить аналитическое решение, либо имеется численное решение, найденное другим численным методом.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННОГО НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА

4.1 Методика исследования

На основании проведённого в первом разделе анализа, для восстановления изношенных деталей выбрали автоматическую электродугую наплавку под слоем флюса.

При восстановлении изношенных поверхностей детали надо стремиться получить наплавленный металл износостойкостью не меньше основного металла без дефектов, т.е. получить равнопрочность сварного соединения и основного металла. Как было отмечено в первом разделе, это не всегда получается, особенно при восстановлении высокоуглеродистых сталей. Иногда при проведении контроля качества в сварном соединении не видны дефекты, но есть места очагов возможного зарождения трещин. После наплавки часто прибегают к разным способам снятия или снижения сварочных напряжений и одновременно - упрочнения наплавленной поверхности.

После наплавки обычно требуется термообработка. Один из вариантов посленаплавочной обработки поверхности с пластическим деформированием будет исследован в данной работе.

Поверхностное пластическое деформирование обеспечивает изменение структуры металла, но без его полной рекристаллизации. Важной характеристикой состояния поверхностного слоя являются остаточные напряжения.

Методы определения остаточных напряжений подразделяются на расчетные и экспериментальные.

Экспериментальные методы основаны главным образом на принципе разрезки металла и освобождении его от остаточных напряжений.

Для исследования необходимо изготовить наплавленные образцы с трещинами или местами, где есть вероятность зарождения этих трещин. После изготовления образцов с трещинами готовим их для пластического деформирования наплавленного металла с целью устранения этих дефектов.

Для проведения эксперимента выбрали сталь 45 и сталь 60, сварочные материалы СВ08ХГ2СМФ и плавленный флюс АН-348А.

Сталь 45 - углеродистый качественный сплав с легкостью переносит температурные испытания, производимые в диапазоне 200-600°C при удельном весе в

7826 кг/м³, твердость по Бринеллю которой составляет 170МПа, имеет модуль упругости в $E 10^{-5} = 2\text{МПа}$ (при 20°C) и предел прочности 245МПа.

Плотность стали 45 по ГОСТ 1050-88 составляет 7826-7595 кг/м³ в диапазоне 20-800°C.

Сталь 45 считается материалом трудносвариваемым, однако ему не свойственна отпускная хрупкость. Это достаточно весомый фактор при создании конструкций сложных форм и конфигураций.

Сталь 60 - конструкционная углеродистая качественная.

Химический состав сталь 45 и стали 60 приведен в таблице 4.1.

Таблица 4.1 Химический состав стали 45 и стали 60

Марка стали	C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu	P	S
				не более				
Сталь 45	0,42-0,50	0,17-0,37	0,50-0,80	0,25	0,25	0,25	0,035	0,04
Сталь 60	0,57-0,65	0,17-0,37	0,50-0,80	0,25	0,25	0,25	0,035	0,04

Проволока СВ08ХГ2СМФ и плавленный флюс АН-348А успешно применяется для восстановления гребней колесных пар подвижного состава. Необходимо отметить, что несмотря на то, что износостойкость наплавленного металла минимум в 2 раза превосходить износостойкость ненаплавленных гребней, проблема снизить вероятность появления как горячих, так и холодных трещин пока является актуальной.

Сталь 60 по химическому составу близка колесной стали. Образцы для испытания наплавливали на лабораторной установке АДФ-1202 под слоем флюса. Образцы из стали 45 и стали 60 с размерам 500x300 мм, толщиной материала 16 мм, жестко закрепляли на основании сварочного стола с помощью зажимов.

Основные параметры режимов наплавки: сварочный ток $I_{св}=310-330$ А, напряжение дуги $U=34-36$ В и скорость наплавки $v_{напл}=20$ м/час, диаметр электродной проволоки $d_{эл}=4$ мм.

Эти режимы оптимальные и для производственных условиях. С уменьшением параметров режимов наплавки увеличивается сопротивление появлению трещин, но сильно падает производительность. С другой стороны, с увеличением сварочного тока до 350-370 А и напряжения до 38-40 В увеличивается производительность, но и увеличивается вероятность появления дефектов типа трещин [34].

Химический состав сварочный проволоки СВ08ХГ2СМФ и флюса АН-348А приведены в таблице 4.2 и 4.3

Таблица 4.2 Химический состав сварочного флюса

Флюс	SiO ₂	MnO	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	CaF ₂	Fe ₂ O ₃	S	P
АН-348А	42,50	35,0	6,0	6,0	4,0	4,50	2,0	0,0030	0,11

Таблица 4.3 Химический состав сварочной проволоки

Сварочная проволока	Содержание элементов, %								
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ca	S	P
Св-08ХГ2С МФ	0,08	0,68	1,80	1,14	0,64	0,23	0,05	0,017	0,010

4.2 Технология наплавки, экспериментальный стенд и измерительные приборы

Экспериментальное исследование проводилось на лабораторной установке дуговой сварки государственного университета Акакия Церетели.

При наплавке образцов на выбранных режимах сварки, каждый второй валик перекрывал наполовину предыдущий валик и так продолжалось до конца наплавки первого слоя для уменьшения доли основного металла в наплавленном металле и тем самым увеличения сопротивления появлению трещин. Планировали, что содержание углерода в наплавленном металле не более 0,18 %. Температуру начала наплавки каждого валика измеряли с помощью контактного термометра ТК-5.03. Наплавку производили без перерыва до конца наплавки первого слоя, чтобы структура наплавленного металла была одинаковой по всей наплавленной поверхности металла.

Стенд для наплавки образцов показан на рисунке 4.1.



Рис.4.1 Стенд для наплавки образцов

Автомат АДФ-1202 предназначен для дуговой сварки под флюсом постоянным током стальной электродной проволокой диаметром 2-6 мм изделий из низкоуглеродистых и низколегированных сталей толщиной 3-10 мм.

Структура условного обозначения АДФ-1202:

А - автомат;

Д - для дуговой сварки;

Ф - под слоем флюса;

12 - номинальный сварочный ток, в сотнях ампер;

02 - номер модификации.

Автомат состоит из самоходной тележки, на которой через посредство горизонтального и вертикального суппортов крепятся подающая головка с токоподводом и светуказателем, барабан для проволоки и пульт управления.

Автомат комплектуется источником сварочного тока - выпрямителем типа ВДУ-1202.

В автомате осуществляется зажигание дуги, ее поддержание и перемещение вдоль шва с непрерывной подачей флюса в зону сварки. В качестве электрода применяется проволока, уложенная в барабан, которая непрерывно подается в зону сварки.

Схема управления выполнена на полупроводниковых элементах и обеспечивает необходимый цикл работы автомата, плавное регулирование, стабилизацию скорости

сварки и подачу электродной проволоки. Корректировка положения сварочной горелки относительно свариваемого шва производится суппортами автомата вручную.

Наплавленный первый слой показан на рисунке 4.2 и видно что, поверхность наплавленного металла не очень гладкая.



Рис.4.2 Первый слой наплавленного металла

Второй слой на образец наплавляли без охлаждения первого слоя. Вид поверхностей второго слоя наплавленного металла более равномерная, что связано с температурой металла во время наплавки второго слоя.

На рисунке 4.3 показан второй слой наплавленной поверхности и по рисунку можно увидеть, что после второго наплавленного слоя поверхность металла стала более гладкой.



Рис.4.3 Второй слой наплавленной поверхности

Кроме вышеописанных образцов наплавливали одиночные валики в один и в два слоя.

В процессе наплавки желательно получение наплавленного слоя с минимальным проплавлением основного металла с учетом того, что детали работающие на трение и износ в основном изготовлены из высокопрочных сталей с высоким содержанием углерода, в противном случае возрастает доля основного металла в формировании наплавленного слоя и вероятность появления дефектов.

При наплавке необходимо обеспечение минимальной зоны термического влияния и минимальных напряжений и деформации. Это требование обеспечивается за счет уменьшения глубины проплавления регулированием параметров режима, погонной энергии, увеличением вылета электрода, применением широкой электродной ленты и другими технологическими приемами.

4.3 Изготовление образцов для пластической деформации

Для исследования структуры, зоны сварного соединения и механических свойств при наличии трещин, необходимо изготавливать наплавленные образцы из стали 45 и стали 60. После наплавки из наплавленных пластин с помощью механической пилы из середины пластины наплавленного металла вырезали образцы разных размеров (рис.4.4).

Из вырезанных образцах с относительно ровными поверхностью наплавленного металла. С помощью строгальных и фрезерных станков образца обрабатывали по толщине для получения микро- и макрошлифов. Для исследования отбирали по три микро- и макрошлифа с разным количеством и размерами трещин. Микрошлифы образцов травили 4%-ной азотной кислотой.



Рис.4.4. Вырезанные образцы, наплавленные в один и два слоя

Образцы для пластического деформирования изготавливали разных размеров и к ним приваривали технологические рукоятки для удобства обработки молотом и при деформировании на лабораторном прокатном стане.

4.4 Результаты экспериментального исследования пластически деформированного наплавленного металла

Изготовленные образцы нагревали до 650-700⁰С в муфельной печи и производили пластическое деформирование наплавленной поверхности образцов молотом.

Сопоставление образцов стали 60, наплавленных в один и в два слоя, показывает, что количество трещин и их размеры гораздо больше при однослойной наплавке (рис.4.5), что вероятно связано с тем, что в этом случае доля участия основного металла в наплавленном металле гораздо больше, чем при двухслойной (рис.4.6).



Рис.4.5. Количество трещин и их размеры при однослойной наплавке стали.



Рис.4.6. Количество трещин и их размеры при двухслойной наплавке стали.

На образцах, изготовленных из стали 45, в наплавленном металле трещины не обнаружены, что вероятно связано с содержанием углерода в наплавленном металле, где максимальное содержание углерода 0,13%, в то время как в наплавленных образцах стали 60 содержание углерода меняется в пределах 0,15-0,17%.

В образцах, при наплавке стали 45 в два слоя без перерыва, трещины, возникшие в первом слое, переплавлялись во втором слое.

После пластической деформации трещины исчезают только в таких образцах, где были наплавлены отдельные валики (рис.4.7). В образцах, где было наплавлено восемь и больше валиков, количество трещин после пластической обработки снижается, но полностью они не исчезают и остаются отдельные трещины (рис.4.8), что связано с понижением температуры в процессе эксперимента до 200-250⁰С, что недостаточно для дальнейшей обработки.



Рис.4.7. Микрошлиф наплавленного отдельного валика.



Рис.4.8. Макрошлиф наплавленного металла на сталь 60

Во всех образцах в металле шва в разной степени происходило измельчение структуры и исчезновение грубых кристаллитов.

Пластическую деформацию подогретого до 600°C наплавленного металла осуществляли с помощью молота (рис.4.9), но из-за большого размера наплавленного металла и с понижением температуры до 200°C , трещины полностью не исчезали. Поэтому эксперименты были продолжены на прокатном стане.



Рис.4.9. Образец, обработанный молотом

Полученные результаты показывают, что в дальнейшем эксперименты для образцов больших размеров нужно продолжать на прокатных станах.

Образцы стали 60, наплавленные в два слоя, подвергались пластическому деформированию на лабораторном прокатном стане.

В наплавленных образцах, подвергавшихся обработке на прокатном стане, трещины исчезали полностью (рис.4.10).



Рис.4.10 Образец без трещин после пластической деформации

Микроструктура наплавленного металла первого слоя представляет собой троостит с легированным ферритом (рис.4.11а). В последнем слое структура сорбитная с коагулированной цементитной составляющей (рис.4.11б), твердостью 285-330 НV.

Микроструктура околошовной зоны представляет бейнит с пластинчатым сорбитом, твердостью 290-340 НV. В некоторых участках наблюдается мартенситная структура (рис.4.11 в).



а

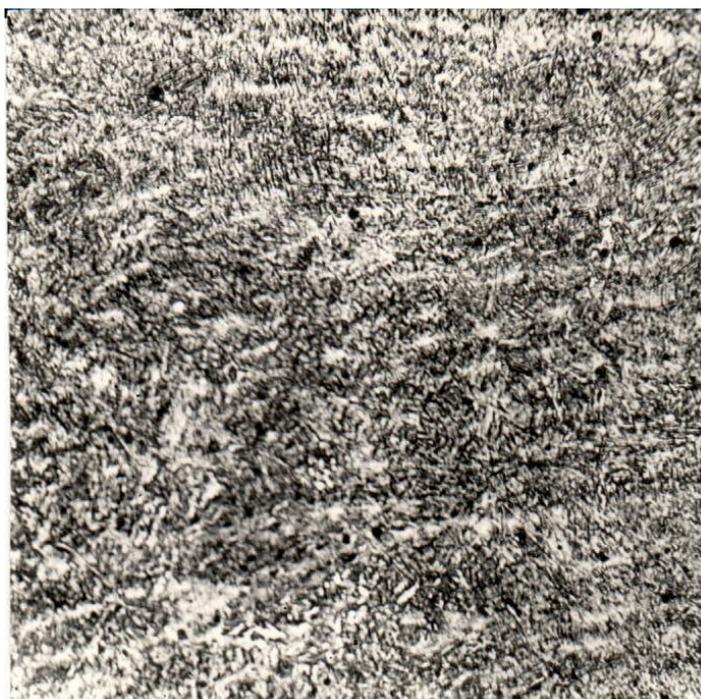




Рис.4.11 Микроструктура наплавленного металла (а,б)
и околошовной зоны (в).

Сопоставление результатов обработанных образцов, нагретых в интервале 600-700⁰С показывает, что в образцах, которые подвергались пластическому деформированию на прокатном стане, трещины полностью исчезают. Структура поверхностного слоя благоприятная. Твердость наплавленного металла показывает, что его износостойкость будет больше, чем металла сталь 60. Что касается образцов, обработанных молотом, устранение трещин зависят от площади наплавленного металла. Если площадь наплавленного металла небольшая (одиночные валики), трещины устраняются пластической деформацией. А в образцах больших размеров, из-за снижения температуры ниже 200⁰С, после пластического деформирования остаются отдельные трещины.

Таким образом:

1. Количество и размеры трещин в наплавленном металле зависят от доли участия основного металла в наплавленном и от химического состава металла.

2. Оптимальная температура нагрева для посленаплавочной пластической деформации находится в интервале $650-700^{\circ}\text{C}$, что дает возможность устранить дефекты сварного соединения и наплавленного металла. Увеличивается прочность (износостойкость) наплавленного металла.
3. Вероятность устранения трещин в наплавленном металле в процессе пластического деформирования зависит от площади наплавленного металла, вида обработки и снижается с понижением температуры.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Изучена одномерная задача пластического деформирования наплавленного слоя на плоской поверхности при обкатке цилиндрическим роликом, с учетом закона трения Кулона на поверхности контакта. Уравнение состояния материала выбрано на основе теории ползучести (теории упрочнения).
2. Разработана прикладная программа в математическом редакторе Mathcad для численного анализа нелинейной одномерной задачи.
3. Расчетами установлено, что напряженно-деформированное состояние в очаге деформации существенно зависит от величины λ ($\lambda = h_0 / R; h_0, R$ - толщина слоя до деформации и радиус ролика соответственно) и от коэффициента трения μ на поверхности контакта материала с роликом.
4. Установлено, что при определенных значениях λ силы трения меняют направление на малом участке поверхности контакта. Контактное давление принимает максимальное значение в точке поверхности контакта с угловой координатой $\alpha = 0,05$, а затем уменьшается. При значениях $\lambda = 0,5$ и $\mu = 0,3$ нормальное напряжение в направлении обкатки существенно уменьшается и фактически равняется нулю.
5. Сформулирована двумерная задача неупругого деформирования наплавленного слоя при обкатке. Получена замкнутая система нелинейных дифференциальных уравнений на основе теории упрочнения и записаны граничные условия;
6. Для численного решения нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных предложен метод сеток. Система дифференциальных уравнений и граничные условия записаны в конечных разностях. Граничные условия вблизи криволинейной поверхности контакта записаны с использованием линейной интерполяции.
7. Установлено, что количество и размеры трещин наплавленного металла зависят от доли участия основного металла в наплавленном и от химического состава металла.

8. Оптимальная температура нагрева для посленаплавочной пластической деформации находится в интервале 650-700⁰С, что дает возможность устранить дефекты сварного соединения и наплавленного металла. Увеличивается прочность (износостойкость) наплавленного металла.
9. Установлено, что вероятность устранения трещин в наплавленном металле в процессе пластического деформирования зависит от площади наплавленного металла, вида обработки и снижется с понижением температуры.
10. Разработанная методика расчета наплавленного слоя, может быть использована для определения параметров технологического процесса при восстановлении плоских поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авт.св. №212308 и №346355, ТМО (Башкирский с/х инст.)
2. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз. 1963. - 233 с.
3. Бойко Н.И. Распределение температуры в зоне обработки наплавленного металла //Повышение надёжности и долговечности путевых и строительных машин технологическими методами: Межвуз. сб. науч. тр. Вып.142. – Ростов-н/Д: РИИЖТ, 1978. - с.82-86.
4. Бойко Н.И. Расчёт температуры наплавленного металла в зоне деформации. /Эксплуатация и ремонт транспортных и путевых машин: Межвуз. сб. науч. тр. Вып.93 - Ростов-н/Д: РИИЖТ, 1973. - с.106-108 .
5. Бойко Н.И., Богачёв В.А. Технология наплавки и температурные поля при комплексном восстановлении цилиндрических деталей. //Сварочное производство, 1984, №4. - с.5-7.
6. Бойко Н.И., Хачкинаян А.Е. Математическое и компьютерное моделирование технологического процесса поверхностной пластической деформации наплавленного слоя деталей. //Актуальные проблемы развития железнодорожного транспорта: Сб. науч. тр. молодых учёных, аспирантов и докторантов. /Под ред. д-ра техн. наук, проф. А.Н.Гуды. – Ростов-н/Д: Рост.гос.ун-т путей сообщения, 2003. - с.21-24
7. Бойко Н.И., Хачкинаян А.Е. Улучшение структуры наплавленного металла деталей поверхностным пластическим деформированием. //Тр. 62-й вузовской науч.-теорет. конф. проф.-преп. сост.: «Транспорт-2003». – Ростов-н/Д: РГУПС, 2003. - с.161-162.
8. Браславский В.М. Технология обкатки крупных деталей роликами. - М.: Машиностроение, 1975. – 160 с.
9. Булекбаева Г.Ж., Киквидзе О.Г., Кипиани П.Н. Пластическая деформация как средство для устранения дефектов типа трещин в сварных соединениях//Kutaisi. BULLETIN OF AKAKI TSERETELI STATE UNIVERSITY №1(7).- 2016.-pp..
10. Винокуров В.А., Григорьянц А.Г. Теория сварочных деформаций и напряжений. - М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
11. Волжин Т.Н., Ровках С.Е., Вердников В.Г. Восстановление изношенных деталей строительных машин. - М.: Стройиздат, 1968. – 237 с.
12. Волков Е.А. Численные методы. 2-е изд. - М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. лит., 1987. - 248 с.

13. Воловик Е.Л. Справочник по восстановлению деталей. - М.: Колос, 1981. – 51 с.
14. Генки Г. О медленных стационарных течениях в пластических телах с приложениями к прокатке, штамповке и волочению. – В кн.: Теория пластичности: - М.: Гос. изд-во иностр. литер., 1948, с.136-156.
15. Грабин В.Ф. Металловедение сварки плавлением. – Киев: Наукова думка, 1982. – 414 с.
16. Грохольский Н.Ф. Восстановление деталей машин и механизмов сваркой и наплавкой. - М.-Л.: Машгиз, 1962. – 275 с.
17. Жукова Е.Н., Фонштейн И.М. Влияния серы на сопротивление низколегированных сталей хрупкому разрушению. //Сталь, 1981, №5.
18. Илюшин А.А. К вопросу о вязкопластическом течении материала. //Груды конф. по пластическим деформациям. - М: Изд-во АН СССР, 1938, с.5-18.
19. Ишлинский А.Ю. Прокатка и волочение при больших скоростях деформирования. //Прикладная математика и механика, 1943, т.VII, вып.3, с. 226-230.
20. Какуевицкий В.А. Износостойкость коленчатых валов, восстановленных различными способами. //Сварочное производство, 1968, № 5, с.26-28.
21. Касаткин Б.С., Стрижиус Г.Н., Царюк А.К. и др. Имитация структуры ЗТВ и холодных трещин при сварке среднелегированной стали. //Автоматическая сварка, 1990, №2, с.1-5.
22. Касрадзе Д.Х. Расчет сопротивления деформированию при термомеханической обработке (ТМО) наплавленных поверхностей для двумерной зоны деформации. //Международный научный журнал «Проблемы прикладной механики», №4(5), 2001
23. Касрадзе Д.Х., Гачечиладзе Г.Р., Касрадзе Т.Д. Виды термомеханической обработки (ТМО) наплавленных поверхностей. //Международный научный журнал «Проблемы прикладной механики». №4(5), 2001.
24. Киквидзе О.Г., Тулеугалиева Г.Б., Булекбаева Г.Ж., Бекенова А., Билашова Г. Расчет граничного слоя при пластическом деформировании поверхностей. //Georgian Engineering News, №4 (Vol.60). - 2011. - pp.51-55
25. Киквидзе О.Г., Булекбаева Г.Ж., Кипиани П.Н. Пластическое деформирование наплавленного слоя на плоской поверхности/ //Georgian Engineering News, №1, (Vol.). - 2016. - pp.
26. Киквидзе О.Г., Чумбадзе А. Исследование высокотемпературной ползучести стали 10ГН2МФА. //Тр. 50-го междунар. симп. «Актуальные проблемы прочности», 27.09-01.10.2010. – Витебск: Беларусь, 2010. - с.163-165.

27. Киквидзе О.Г., Тулеугалиева Г.Б., Ерниязов М. Полный факторный план при исследовании ползучести металлов. //Тр 53-ей междунар .конф. «Актуальные проблемы прочности», 2-5 октября, 2012. – Витебск: Беларусь, 2012. - с.182-184.
28. Кипиани П.Н., Миндадзе С.О., Павлов Н.В., Струнец В.К. Структурно-трибологические особенности поверхностей трения деталей железнодорожного подвижного состава, восстановленных износостойкой наплавкой. //Сб. Тр. XI международной науч.-техн. конф. «Проблемы сварки, металлургии и родственных технологий», Тбилиси, 2006. - с.141-153
29. Кипиани П.Н. Влияние технологических факторов на свойства металла шва и ЗТВ при наплавке гребней цельнокатанных вагонных колес. /Тр. Грузинского технического университета, № 1(429), 2000, - с.59-63.
30. Кипиани П.Н., Зивзивадзе Л.И., Шаламберидзе М.Ш. Влияние вредных примесей на сопротивляемость металла против образования горячих трещин при наплавке гребней колес железнодорожного подвижного состава. /Тр КГТУ, №2(12), Кутаиси, с.124-128
31. Кипиани П.Н., Зивзивадзе Л.И., Шаламберидзе М.Ш. Влияние режимов наплавки на сопротивляемость металла против образования горячих трещин при наплавке гребней и бандажей локомотивных колес./Тр. КГТУ, №2(12), Кутаиси, с.162-167.
32. Кипиани П.Н., Котляров А.Н. Влияние технологических факторов на качество наплавленного металла при восстановлении гребней вагонных колес. /Сб. научных трудов "Ресурсосберегающие технологии восстановления железнодорожной техники сваркой, наплавкой и напылением". - Москва, 1998, - с.46-51.
33. Кипиани П.Н., Миндадзе С.О., Булекбаева Г.Ж. Разработка энергосберегающей технологии с применением послесварочной пластической деформации при сварке и наплавке высокопрочных сталей// III International Scientific Conference ENERGY:REGIONAL PROBLEMS AND DEVELOPMENT OPPORTUNITIES 24-25.10.2015 Kutaisi, Georgia.-pp.234-236
34. Киселёв С.Н., Аксёнова Л.А., Засыпкин В.В. Технология сварочного производства при ремонте подвижного состава: Учебное пособие. - М.: МРШТ, 1983. – 99 с.
35. Козлов Р.А. Сварка теплоустойчивых сталей. - Л.: Машиностроение, 1986. – 160 с.
36. Колачев Б.Л. Водородная хрупкость металлов. - М.: «Металлургия», 1985. – 217 с.
37. Котрел К.Л. Требования, предъявляемые к высокопрочной стали. /В сборнике: «Высокопрочная сталь». - М.: Металлургиздат, 1965. - с.9-23.

38. Кряжков В.М. Восстановление деталей сельскохозяйственной техники механизированной наплавкой с применением упрочняющей технологии. - М.: ГОСНИТИ, 1972. - 208с.
39. Куликов Г.Д. Современные способы восстановления деталей наплавкой. - Челябинск: Южно-Уральское кн.изд., 1974. – 181 с.
40. Лившиц Л.С., Гринберг Н.А., Куркумели Э.Г. Основы легирования наплавленного металла. – М.: Машиностроение, 1969. – 188 с.
41. Лившиц Л.Г., Поляченко А.В. Восстановление автотракторных деталей. - М.: Колос, 1966. – 479 с.
42. Макара А.М., Грабин В.Ф., Петров Ю.Н. и др. Взаимосвязь холодных трещин со структурой высокопрочных швов. //Автоматическая сварка, 1972, №7. – с.1-5.
43. Макара А.М., Мосендз И.А. Сварка высокопрочных сталей. - Киев: Изд-во «Техника», 1971. - 139 с.
44. Макаров Э.Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. – М.: Машиностроение, 1981. – 247 с.
45. Малинин Н.Н. Ползучесть в обработке металлов. – М.: Машиностроение, 1986. - 216 с.
46. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. Учебник для студентов вузов. Изд.2-е, перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1975. – 399 с.
47. Малинин Н.Н. Технологические задачи пластичности и ползучести. Учебное пособие для студентов машиностроительных специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1979. - 119 с.
48. Метлин Ю.К., Новиков И.В., Акильев С.А. Восстановление изношенных деталей дорожных машин. - М.: Транспорт, 1977. – 184 с.
49. Мусияченко В.Ф. Свариваемость и технология сварки высокопрочных сталей. - Киев: «Наукова думка», 1983. – 430 с.
50. Наливкин В.А. Централизованное восстановление деталей автоматической наплавкой и сваркой. - Саратов: Приволжское кн.изд., 1965. - 188 с.
51. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. - М.: Машиностроение, 1987. - 328 с.
52. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением. /Под ред. В.Е.Патона. - М.: Машиностроение, 1974. - 768 с.
53. Поляк М.С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения. В2 т., Т.1. - М.: Скрипт, Машиностроение, 1995. – 832 с.

54. Попова В.В. Поверхностное пластическое деформирование и физико-химическая обработка: Учебное пособие по дисциплине «Процессы и операции формообразования» для студентов всех форм обучения направления подготовки 151900 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств». – Рубцовск: Рубцовский индустриальный ин-т, 2013. - 98 с.
55. Прохоров Н.Н. Горячие трещины при сварке. - М.: Машиздат, 1963. с.
56. Разигов М.И., Толстов И.А. Справочник мастера наплавочного участка. - М.: Машиностроение, 1966. - 200 с. 177
57. Раймонд Э.Д., Шиганов Н.В. Применение местного кратковременного нагрева для предупреждения возникновения холодных трещин. //Сварочное производство, 1972, №11, с.17.
58. Романов К.И. Механика горячего формоизменения. - М.: Машиностроение, 1993. - 240 с.
59. Руководство по электродуговой сварке под флюсом /Под ред. Б.Е.Патона. - М.: Машгиз, 1957. – 428 с.
60. Рыкалин Н.Н. Расчёт тепловых процессов при сварке. - М.: Машгиз. 1951. – 296с.
61. Сагалевиц В.М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений. - М.: Машиностроение, 1974. – 248 с.
62. Сварка в машиностроении. Справочник. Т.2. /Под ред. А.И.Акулова. - М.: Машиностроение, 1978 - 462 с.
63. Сидоров А.И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой. - М.: Машиностроение, 1987. - 192 с.
64. Счасливцев В.М., Табачникова Т.И., Яковлева И.Л. и др. Исследование структуры зоны термического влияния соединений высокопрочных сталей при одно- и двухдуговой механизированной сварке. //Автоматическая сварка, 1984, №10, с.1-4.
65. Талыпов Г.Б. Приближенная теория сварочных деформаций и напряжений. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1957. - 206 с.
66. Технология металлов и материаловедение. /Кнорозов Б.В., Усовал Л.Ф., Третьяков А.В. и др. - М.: Металлургия, 1987. - 800 с.
67. Трочун И.П. Внутренние усилия и деформации при сварке. - М.: Машгиз, 1964. - 247 с. (38)
68. Турчак Л.И. Основы численных методов: Учеб. пособие. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 320 с.
69. Фрумин И.И. Автоматическая электродуговая наплавка. - Харьков: Metallurgizdat, 1961. - 421с.

70. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление. - М.: Машиностроение, 1985. - 240с.
71. Хачкинаян А.Е., Бойко Н.И. Влияние параметров накатки роликами наплавленного металла на остаточные напряжения восстановленных деталей. //Совершенствование технологии организации обеспечения работоспособности машин с использованием восстановительно-упрочняющих процессов: Сб. науч. ст. По материалам междунар. науч.-техн. конф. - Саратов: СГТУ, 2003. - с.243-249.
72. Шадричев В.А. Основы выбора рационального способа восстановления автомобильных деталей металлопокрытиями. - М.: -Л.: Машгиз, 1982. – 296 с.
73. Школьник Л.М., Шахов В.И. Технология и приспособления для упрочнения и отделки деталей накатыванием. - М.:Машиностроение, 1964. – 184 с.
74. Шляпин В.Б., Виноградов Ю.Б., Шахнов Ю.И. Вибродуговая наплавка под флюсом деталей подвижного состава. - М.: Трансиздат, 1962. – 26 с.
75. Якушин Г.М., Макаров Э.Л., Рыжов Н.М. Связь очагов холодных трещин со структурой металла шва высокопрочных сталей. //Сварочное производство, 1973, №5, с.4-6.

Пластическое деформирование наплавленного
слоя в системе Mathcad на основе теории упрочнения

$$\epsilon_{y0} := -2.16 \cdot 10^{-6} \cdot 273 \quad \epsilon_{y0} = -8.736 \times 10^{-3}$$

$$x_{10} := e^{\epsilon_{y0}} \quad x_{10} = 0.991$$

$$\alpha_0 := \arccos(x_{10}) \quad \alpha_0 = 0.132 \quad x_0 := \alpha_0$$

$$i := 0..10 \quad x_i := 0 + \alpha_0 \cdot \frac{i}{10}$$

$$\mu := -0.3$$

$$s_m := 0.147$$

$$s_n := 0.157$$

$$\lambda := 0.1$$

$$y_{1_i} := e^{-\int_{0.0}^{x_i} \frac{1}{\lambda + 1 - \cos(x)} \left(\sin(x) + \frac{\sin(x) - \mu \cdot \cos(x)}{1 + \mu \cdot \tan(x)} \right) dx}$$

$$y_{2_i} := e^{\int_{0.0}^{x_i} \frac{1}{\lambda + 1 - \cos(x)} \left(\sin(x) + \frac{\sin(x) - \mu \cdot \cos(x)}{1 + \mu \cdot \tan(x)} \right) dx}$$

	0
0	1
1	0.959
2	0.917
3	0.874
4	0.83
5	0.785
6	0.741
7	0.697
8	0.654
9	0.612
10	0.571

y1 =

$$y_{3_i} := \int_{0.0}^{x_i} \frac{y_{2_i}}{\lambda + 1 - \cos(x)} \cdot \left(\frac{\sin(x) - \mu \cdot \cos(x)}{1 + \mu \cdot \tan(x)} + \frac{\cos(x)}{2} \right) \cdot \tan(x)^{s_m} \cdot \ln\left(\frac{1}{\cos(x)}\right)^{s_n} dx$$

$$\sigma_{y_i} := y_{1_i} \cdot y_{3_i}$$

$$\sigma_{e_i} := \tan\left(\frac{x_i}{1}\right)^{s_m} \cdot \ln\left(\frac{1}{\cos\left(\frac{x_i}{1}\right)}\right)^{s_n}$$

$$p_i := \frac{(-\sigma_{y_i}) + \sigma_{e_i}}{1 + \mu \cdot \tan\left(\frac{x_i}{1}\right)}$$

$$M_i := -\mu \cdot \int_{0.0}^{x_i} p_i dx$$

$$Tz_i := \int_0^{x_i} p_i \cdot (\cos(x) + \mu \cdot \sin(x)) dx$$

$$Ty_i := \int_0^{x_i} p_i \cdot (\sin(x) - \mu \cdot \cos(x)) dx \quad \epsilon_{y_i} := \epsilon_{y0} + \ln\left(\frac{1}{\cos\left(\frac{x_i}{1}\right)}\right)$$

$$\Delta h := \frac{1 - e^{2 \cdot \epsilon_{y0}}}{2}$$

$$\Delta h = 8.66 \times 10^{-3}$$

$$\sigma_{z_i} := (-p)_i \cdot \left(1 + \mu \cdot \tan\left(\frac{x_i}{1}\right)\right)$$

$$\alpha_i := x_i$$

$\sigma_{y_i} =$

0
$8.907 \cdot 10^{-3}$
0.025
0.045
0.069
0.097
0.127
0.16
0.195
0.232
0.272

 $\sigma_{\epsilon_i} =$

0
0.122
0.168
0.202
0.231
0.256
0.279
0.299
0.318
0.336
0.353

 $p_i =$

0
0.114
0.144
0.159
0.165
0.163
0.156
0.144
0.127
0.108
0.085

 $\sigma_{z_i} =$

0
-0.113
-0.143
-0.157
-0.162
-0.16
-0.152
-0.14
-0.123
-0.104
-0.081

 $T_{z_i} =$

0
$1.495 \cdot 10^{-3}$
$3.794 \cdot 10^{-3}$
$6.265 \cdot 10^{-3}$
$8.614 \cdot 10^{-3}$
0.011
0.012
0.013
0.013
0.013
0.011

 $T_{y_i} =$

0
$4.594 \cdot 10^{-4}$
$1.193 \cdot 10^{-3}$
$2.015 \cdot 10^{-3}$
$2.834 \cdot 10^{-3}$
$3.577 \cdot 10^{-3}$
$4.181 \cdot 10^{-3}$
$4.587 \cdot 10^{-3}$
$4.74 \cdot 10^{-3}$
$4.586 \cdot 10^{-3}$
$4.072 \cdot 10^{-3}$

 $M_i =$

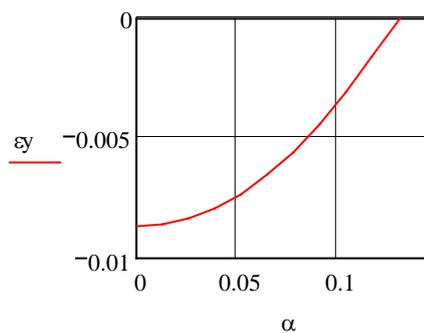
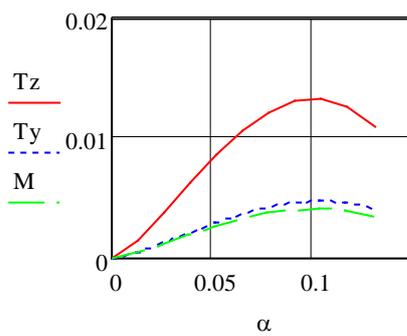
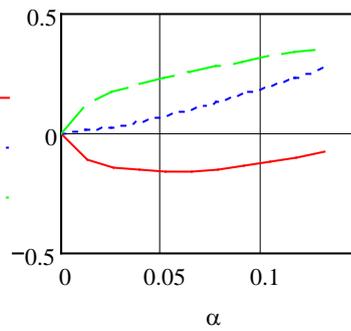
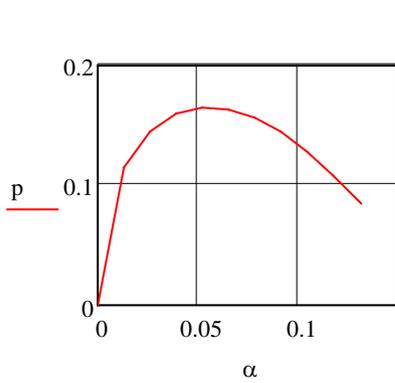
0
$4.495 \cdot 10^{-4}$
$1.143 \cdot 10^{-3}$
$1.891 \cdot 10^{-3}$
$2.606 \cdot 10^{-3}$
$3.225 \cdot 10^{-3}$
$3.697 \cdot 10^{-3}$
$3.98 \cdot 10^{-3}$
$4.038 \cdot 10^{-3}$
$3.836 \cdot 10^{-3}$
$3.347 \cdot 10^{-3}$

 $\alpha_i =$

0
0.013
0.026
0.04
0.053
0.066
0.079
0.092
0.106
0.119
0.132

 $\epsilon_{y_i} =$

$-8.736 \cdot 10^{-3}$
$-8.649 \cdot 10^{-3}$
$-8.388 \cdot 10^{-3}$
$-7.952 \cdot 10^{-3}$
$-7.342 \cdot 10^{-3}$
$-6.557 \cdot 10^{-3}$
$-5.597 \cdot 10^{-3}$
$-4.462 \cdot 10^{-3}$
$-3.151 \cdot 10^{-3}$
$-1.664 \cdot 10^{-3}$
0



Пластическое деформирование наплавленного

слоя в системе Mathcad на основе модели нелинейно –вязкого тела

$$\epsilon_{y0} := -2.16 \cdot 10^{-6} \cdot 273 \quad \epsilon_{y0} = -8.736 \times 10^{-3}$$

$$x_{10} := e^{\epsilon_{y0}} \quad x_{10} = 0.991$$

$$\alpha_0 := \arccos(x_{10}) \quad \alpha_0 = 0.132 \quad x_0 := \alpha_0$$

$$i := 0..10 \quad x_i := 0 + \alpha_0 \cdot \frac{i}{10}$$

$$\mu := -0.3$$

$$s_m := \frac{1}{6.693} \quad s_m = 0.149 \quad s_n := 0.$$

$$\lambda := 0.1$$

$$y_{1_i} := e^{-\int_{0.0}^{x_i} \frac{1}{\lambda + 1 - \cos(x)} \left(\sin(x) + \frac{\sin(x) - \mu \cdot \cos(x)}{1 + \mu \cdot \tan(x)} \right) dx}$$

$$y_{2_i} := e^{\int_{0.0}^{x_i} \frac{1}{\lambda + 1 - \cos(x)} \left(\sin(x) + \frac{\sin(x) - \mu \cdot \cos(x)}{1 + \mu \cdot \tan(x)} \right) dx}$$

	0
0	1
1	0.959
2	0.917
3	0.874
4	0.83
5	0.785
6	0.741
7	0.697
8	0.654
9	0.612
10	0.571

$$y_{3_i} := \int_{0.0}^{x_i} \frac{y_{2_i}}{\lambda + 1 - \cos(x)} \cdot \left(\frac{\sin(x) - \mu \cdot \cos(x)}{1 + \mu \cdot \tan(x)} + \frac{\cos(x)}{2} \right) \cdot \tan(x)^{s_m} \cdot \ln\left(\frac{1}{\cos(x)}\right)^{s_n} dx$$

$$\sigma_{y_i} := y_{1_i} \cdot y_{3_i}$$

$$\sigma_{e_i} := \tan\left(\frac{x_i}{1}\right)^{s_m} \cdot \ln\left(\frac{1}{\cos\left(\frac{x_i}{1}\right)}\right)^{s_n}$$

$$p_i := \frac{(-\sigma_{y_i}) + \sigma_{e_i}}{1 + \mu \cdot \tan\left(\frac{x_i}{1}\right)}$$

$$M_i := -\mu \cdot \int_{0.0}^{x_i} p_i dx$$

$$Tz_i := \int_0^{x_i} p_i \cdot (\cos(x) + \mu \cdot \sin(x)) dx$$

$$Ty_i := \int_0^{x_i} p_i \cdot (\sin(x) - \mu \cdot \cos(x)) dx \quad \epsilon_{y_i} := \epsilon_{y0} + \ln\left(\frac{1}{\cos\left(\frac{x_i}{1}\right)}\right)$$

$$\Delta h := \frac{1 - e^{2 \cdot \epsilon_{y0}}}{2}$$

$$\Delta h = 8.66 \times 10^{-3}$$

$$\sigma_{z_i} := (-p)_i \cdot \left(1 + \mu \cdot \tan\left(\frac{x_i}{1}\right)\right)$$

$$\alpha_i := x_i$$

$\sigma y_i =$

0
0.049
0.109
0.175
0.245
0.318
0.395
0.473
0.554
0.637
0.721

$\sigma e_i =$

0
0.524
0.581
0.617
0.644
0.666
0.685
0.701
0.715
0.728
0.74

$p_i =$

0
0.477
0.476
0.448
0.406
0.355
0.297
0.234
0.166
0.095
0.02

$\sigma z_i =$

0
-0.475
-0.472
-0.443
-0.4
-0.348
-0.29
-0.228
-0.161
-0.091
-0.019

$Tz_i =$

0
$6.285 \cdot 10^{-3}$
0.013
0.018
0.021
0.023
0.023
0.021
0.017
0.011
$2.54 \cdot 10^{-3}$

$Ty_i =$

0
$1.931 \cdot 10^{-3}$
$3.936 \cdot 10^{-3}$
$5.673 \cdot 10^{-3}$
$6.998 \cdot 10^{-3}$
$7.802 \cdot 10^{-3}$
$7.99 \cdot 10^{-3}$
$7.478 \cdot 10^{-3}$
$6.183 \cdot 10^{-3}$
$4.031 \cdot 10^{-3}$
$9.487 \cdot 10^{-4}$

$M_i =$

0
$1.889 \cdot 10^{-3}$
$3.771 \cdot 10^{-3}$
$5.323 \cdot 10^{-3}$
$6.435 \cdot 10^{-3}$
$7.034 \cdot 10^{-3}$
$7.066 \cdot 10^{-3}$
$6.488 \cdot 10^{-3}$
$5.267 \cdot 10^{-3}$
$3.372 \cdot 10^{-3}$
$7.797 \cdot 10^{-4}$

$\alpha_i =$

0
0.013
0.026
0.04
0.053
0.066
0.079
0.092
0.106
0.119
0.132

$\epsilon y_i =$

$-8.736 \cdot 10^{-3}$
$-8.649 \cdot 10^{-3}$
$-8.388 \cdot 10^{-3}$
$-7.952 \cdot 10^{-3}$
$-7.342 \cdot 10^{-3}$
$-6.557 \cdot 10^{-3}$
$-5.597 \cdot 10^{-3}$
$-4.462 \cdot 10^{-3}$
$-3.151 \cdot 10^{-3}$
$-1.664 \cdot 10^{-3}$
0

