

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Благовский Олег Валерьевич

**УПРАВЛЕНИЕ ФОРМИРОВАНИЕМ ОСТАТОЧНЫХ
НАПРЯЖЕНИЙ В ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЯХ
ПРИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ**

Специальность: 05.02.08 – Технология машиностроения

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор,
Киселев Евгений Степанович

Ульяновск – 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЁВ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ЗАГОТОВОК. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ	9
1.1. Основные параметры качества деталей, изготовленных из труднообрабатываемых материалов	9
1.1.1. Классификация труднообрабатываемых материалов	9
1.1.2. Понятие об усталостной прочности. Основные параметры качества поверхностного слоя, влияющие на эксплуатационные свойства деталей	12
1.2. Технологическое наследование параметров качества поверхностного слоя детали в процессе ее изготовления и эксплуатации	21
1.2.1. Сущность явления технологического наследования	21
1.2.2. Использование теории графов для описания наследственных взаимосвязей	23
1.2.3. Корреляционный анализ и методы статистической обработки экспериментальных данных для описания технологического наследования	24
1.2.4. Программа нагружения как инструмент для описания физических закономерностей технологического наследования	26
1.3. Основные технологические «барьеры» для наследования свойств поверхностных слоев в заготовках из труднообрабатываемых материалов при их механической обработке	29
1.3.1. Понятия о «барьерах» в технологических процессах изготовления деталей	29
1.3.2. Релаксация остаточных напряжений	30

1.4. Особенности и механизмы формирования отдельных характеристик качества поверхностного слоя под воздействием ультразвука	35
1.5. Выводы. Цели и задачи исследования	42
ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛИ ПРИ ЕЁ ИЗГОТОВЛЕНИИ	45
2.1. Моделирование технологического наследования остаточных напряжений в поверхностных слоях деталей машин	45
2.2. Моделирование ультразвуковой релаксации технологических остаточных напряжений	58
2.3. Выводы	63
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПРИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИИ	65
3.1. Методика экспериментальных исследований	65
3.1.1. Показатели технологической эффективности. Контролируемые параметры. Методы и средства измерения	65
3.1.2. Материалы и образцы для экспериментальных исследований	70
3.1.3. Экспериментальная установка для исследования эффективности обработки заготовок типа тел вращения с наложением ультразвуковых колебаний	73
3.1.4. Расчет числа параллельных опытов	78
3.2. Экспериментальное исследование процесса формирования технологических остаточных напряжений при комбинированной обработке точением и ультразвуковым твердосплавным выглажи-	

ванием	80
3.3. Экспериментальное исследование технологического наследования остаточных напряжений при обработке заготовок	94
3.4. Экспериментальное исследование технологического наследования фазового состава поверхностного слоя заготовок из двухфазных материалов	102
3.5. Экспериментальное исследование эффективности ультразвуковой релаксации остаточных напряжений в заготовках из труднообрабатываемых материалов	106
3.6. Проверка адекватности математических моделей для расчета остаточных напряжений с учетом технологического наследования и коэффициента наследования	107
3.7. Выводы	110
ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАПРАВЛЕННОМУ ФОРМИРОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ	112
4.1. Технологические рекомендации по проектированию технологических операций комбинированной обработки заготовок и ультразвуковой релаксации остаточных напряжений	112
4.1.1. Основные положения разрабатываемых технологических рекомендаций	112
4.1.2. Выбор индентора	115
4.1.3. Выбор смазочно-охлаждающего технологического средства	116
4.1.4. Порядок назначения элементов режима обработки	117
4.1.5. Требования безопасности	121
4.1.6. Типовая последовательность выполнения технологических операций	122

4.2. Источники экономической эффективности и расчет ожидаемого экономического эффекта от внедрения результатов	123
4.3. Выводы. Сведения о внедрении результатов исследований	129
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	131
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	134
ПРИЛОЖЕНИЯ	147

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с Указом Президента Российской Федерации № 899 от 7 июля 2011 года «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации», в целях модернизации и развития российской экономики и повышения ее конкурентоспособности, к критическим отнесены технологии создания высокоскоростных транспортных средств и авиационно-космической техники.

Развитие современной высокоскоростной транспортной и авиационно-космической техники сопряжено с все более увеличивающейся долей деталей, изготавливаемых из труднообрабатываемых материалов с особыми физико-механическими свойствами. К таким материалам относятся, в частности, высокопрочные стали, коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные стали, алюминиевые, титановые и никелевые сплавы. Разработка технологических процессов изготовления деталей из труднообрабатываемых материалов сопряжена с необходимостью обеспечения жестких требований к эксплуатационным свойствам детали, а значит и к их геометрическим параметрам и физико-механическим свойствам поверхностных слоёв. К тому же, методы технологического обеспечения этих свойств сопряжены с высокими энергетическими и временными затратами.

Ранее установлено [7, 42], что на состояние поверхностного слоя детали оказывают влияние не только заключительные операции технологического процесса механической обработки заготовки, но и все предшествующие операции. Поэтому для обеспечения заданных эксплуатационных свойств деталей особый интерес вызывает рациональный учет процесса технологического наследования при их изготовлении, позволяющий формировать требуемые параметры качества поверхностного слоя еще на операциях технологического процесса, предшествующих окончательной.

Значительный вклад в развитие концепции и различных аспектов технологического обеспечения параметров качества поверхностных слоёв детали, в том

числе и формируемых с учетом технологического наследования, внесён трудами В.Ф. Безъязычного, В.Ю. Блюменштейна, А.С. Васильева, А.М. Дальского, К.С. Колесникова, Б.А. Кравченко, А.А. Маталина, А.Г. Одинцова, В.М. Смелянского, А.М. Сулимы, А.Г. Суслова, М.Л. Хейфеца, Л.В. Худобина, П.И. Ящерицына и др.

Перспективным направлением совершенствования технологии механической обработки с целью формирования заданных параметров качества поверхностного слоя является применение энергии ультразвукового излучения. Различные аспекты использования энергии ультразвука в процессах механической обработки заготовок исследовали В.К. Асташов, И.К. Вагапов, М.М. Ганиев, Е.С. Киселев, Д. Кумабэ, А.И. Марков, М.С. Нерубай, В.Н. Подураев, Б.Л. Штриков и др.

Исследования, выполненные в последнее десятилетие на кафедре «Технология машиностроения» Ульяновского государственного технического университета, также свидетельствуют о высокой эффективности использования ультразвука для обеспечения требуемых значений целого ряда параметров качества заготовок из различных материалов [30-37, 40]: применение ультразвука при изготовлении деталей из труднообрабатываемых материалов позволяет существенно уменьшить требуемые усилия деформирования, снизить затраты на трение, значительно снизить величину остаточных напряжений без высоких временных и энергетических затрат, усилить проникающее действие смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС), релаксировать технологические остаточные напряжения. Последнее особенно эффективно при введении в технологический процесс операций поверхностно-пластического деформирования.

В представленной диссертации особое внимание было уделено таким важным параметрам качества поверхностного слоя деталей высокоскоростных транспортных средств и авиационно-космической техники как глубина залегания, величина и знак технологических остаточных напряжений и фазовый состав поверхностного слоя, формируемого на протяжении всего технологического процесса их изготовления. Рассмотрен процесс технологического наследования остаточных напряжений и фазового состава материала поверхностного слоя в ходе

выполнения следующих технологических операций на примере изготовления заготовок типа тел вращения (валов):

1. Точение с продольной подачей, совмещенное с ультразвуковым твердо-сплавным выглаживанием, с последующим круглым наружным шлифованием с врезной подачей.

2. Ультразвуковая релаксация после цикла круглого наружного шлифования с врезной подачей.

ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЁВ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ЗАГОТОВОК. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.1.1. Классификация труднообрабатываемых материалов

В настоящее время все более широкое распространение получают высоко-скоростные транспортные средства, в том числе наземные и летательные, детали которых работают при повышенных температурах в условиях знакопеременных нагрузок и агрессивных сред. В качестве материалов для таких деталей используются труднообрабатываемые высокопрочные, коррозионно-стойкие и жаропрочные стали, а также сплавы на основе титана и никеля. Так, доля титановых и жаропрочных сплавов (рис. 1.1) в конструкции двигателей четвертого поколения на 2006 год составляла порядка 89% [26].



Рис. 1.1. Соотношение количества деталей из различных сталей и сплавов в конструкции авиадвигателей 4 поколения [26]

Одним из самых распространенных подходов к классификации конструкционных материалов является использование теории С.Н. Корчака, предложившего использовать в качестве критерия обрабатываемости шлифованием толщину среза при заданной удельной радиальной силе [45]. С.Н. Корчак разработал расчетную

модель обрабатываемости, учитывающую ряд факторов: силу резания, характеристику шлифовального круга, физико-механические свойства обрабатываемого материала. Однако, предложенная им классификация включает в себя только различные марки сталей, в то время как для разделения остальных труднообрабатываемых материалов (например, титановых и жаропрочных сплавов) на группы потребуется провести дополнительные трудоёмкие расчеты.

Наиболее развернутую классификацию труднообрабатываемых сталей и сплавов по обрабатываемости резанием, на наш взгляд, дал Я. Л. Гуревич [25]. В основу классификации он положил химический состав материалов, поскольку от него в основном зависит обрабатываемость жаропрочных сталей и сплавов резанием. Большинство труднообрабатываемых материалов имеет низкую теплопроводность, что приводит к возникновению высоких температур в зоне резания – в 2...3 раза больших, чем при обработке обычных конструкционных материалов. По предлагаемой в работе [25] классификации все труднообрабатываемые стали и сплавы разделены на 8 групп, в каждой из которых объединены материалы примерно одинакового химического состава, с одинаковыми механическими и физическими свойствами и близкой обрабатываемостью резанием:

1. Теплостойкие хромистые, хромникелевые и хроммолибденовые стали перлитного, мартенситно-ферритного и мартенситного классов типа 20X3МВФ, 15X6СЮ, 34ХН3М и др.

2. Коррозионно-стойкие хромистые и сложнолегированные стали ферритного, мартенситно-ферритного и мартенситного классов, представителями которых являются стали 20X13, 40X13, 14X17Н2, 95X18, 11X11Н2ВМФ и др.

3. Коррозионно-стойкие, кислотостойкие, жаростойкие хромникелевые стали аустенитного, аустенитно-ферритного и аустенитно-мартенситного классов типа 12X18Н10Т, 20X23Н18, 07X16Н6 и др.

4. Жаропрочные, жаростойкие, кислотостойкие хромникелевые, хромникелемарганцовистые сложнолегированные стали аустенитного и аустенитно-ферритного классов. Типичными представителями данной группы труднообраба-

тываемых материалов являются стали 10X11H23T3MP, 12X25H16Г7AP, 15X18H12C4TЮP и др.

5. Жаропрочные деформируемые сплавы на железоникелевой и никелевой основах – сплавы типа 36НХТЮ, ХН60ВТ, ХН35ВТЮ, ХН82ТЮМБ и др.

6. Окалийнотойкие и жаропрочные литейные сплавы на никелевой и хромо-вой основах.

7. Титановые сплавы типа ВТ3-1, ВТ9, ВТ22, ОТ4-1 и т.д.

8. Высокопрочные и дисперсионно-твердеющие стали марок 28Х3СНМВФА, 42Х2ГСНМ, Н18К9М5Т и др.

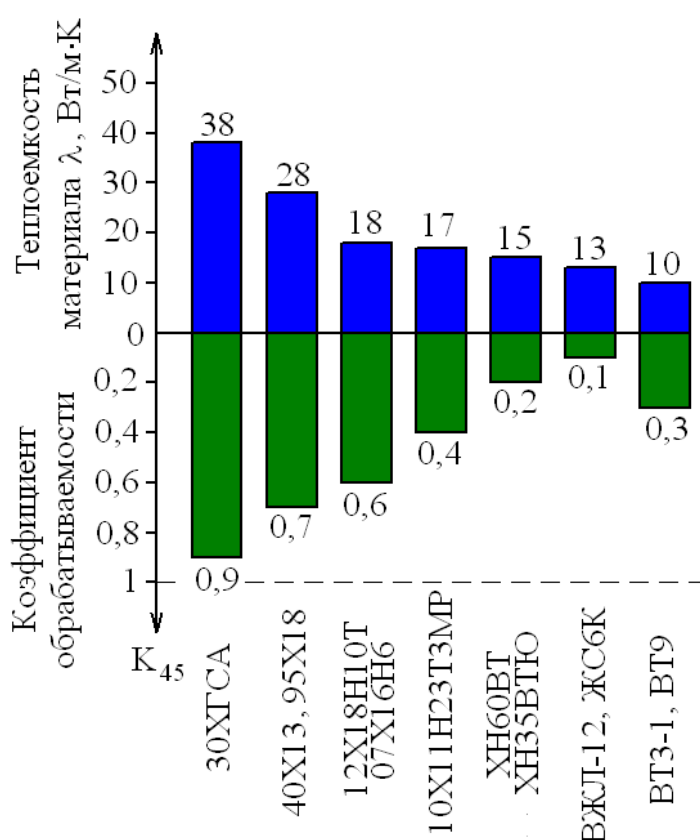


Рис. 1.2. Свойства наиболее распространенных труднообрабатываемых сталей и сплавов

Классификация Я. Л. Гуревича не включает в себя простые конструкционные легированные стали. Согласно ГОСТ 4543, прутки из стали 30ХГСА обладают достаточно высокой прочностью ($\sigma_B = 1080$ МПа), а сам материал имеет коэффициент теплопроводности $\lambda = 38$ Вт/м·К, характерный для первой группы обрабатываемости по [25]. Это позволяет с некоторым допущением включить сталь 30ХГСА в указанную группу труднообрабатываемых материалов в качестве материала образцов для базы сравнения.

На рис. 1.2 приведены примеры свойства наиболее распространенных труднообрабатываемых материалов из различных групп обрабатываемости согласно классификации Я.Л. Гуревича.

1.1.2. Понятие об усталостной прочности. Основные параметры качества поверхностного слоя, влияющие на эксплуатационные свойства деталей

В процессе работы изделий современного машиностроения эксплуатационные напряжения в ответственных деталях могут многократно изменяться как по величине, так и по знаку. Так, например, действию переменных напряжений подвержены силовой набор и обшивка крыла, оперения и фюзеляжа самолетов, лопасти винтов самолетов и вертолетов, лопадки турбин авиационных двигателей, барабаны колес транспортных средств, вагонные оси и многие другие детали.

Общеизвестно, что под действием циклических нагрузок происходит постепенное накопление повреждений в металле, приводящее к образованию трещин и разрушению. Этот процесс называется усталостью, а свойство металлов сопротивляться усталости называют выносливостью.

В настоящее время в связи с увеличением рабочих скоростей движения транспортных средств и связанным с этим возрастанием частот изменения напряжений при одновременном росте их уровня (вследствие стремления уменьшить массу конструкции) именно усталость в подавляющем большинстве случаев является причиной их преждевременного разрушения.

Кривые усталости для различных образцов строятся в полулогарифмических или логарифмических координатах и позволяют определить предел выносливости σ_{-1} , также называемый усталостной прочностью (горизонтальный участок на кривой усталости на рис. 1.3).

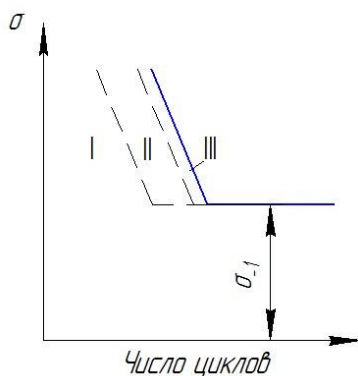


Рис. 1.3. Кривая усталости [63]:

I — зона постепенного накопления напряжений до возникновения трещины; II — зона распространения трещины; III — зона долома

Установлено, что для конструкционных углеродистых и низколегированных сталей предел выносливости при изгибе, как правило, составляет половину от предела прочности [72]:

$$\sigma_{-1} \approx (0,4 \dots 0,5) \cdot \sigma_B. \quad (1.1)$$

Для высокопрочных сталей [76]:

$$\sigma_{-1} \approx 400 + \sigma_B/6. \quad (1.2)$$

Для цветных сплавов усталостную прочность принимают [76]:

$$\sigma_{-1} \approx (0,25 \dots 0,5) \cdot \sigma_B. \quad (1.3)$$

В настоящее время имеется достаточно большое количество исследований, свидетельствующих о том, что определяющее влияние на усталостную прочность и многие другие эксплуатационные свойства (коррозионная стойкость, износостойкость и т.д.) оказывает состояние поверхностного слоя детали.

Согласно [59], поверхностный слой (ПС) – это наружный слой детали с измененными структурой, фазовым и химическим составом по сравнению с основным металлом, из которого сделана деталь (рис. 1.4).

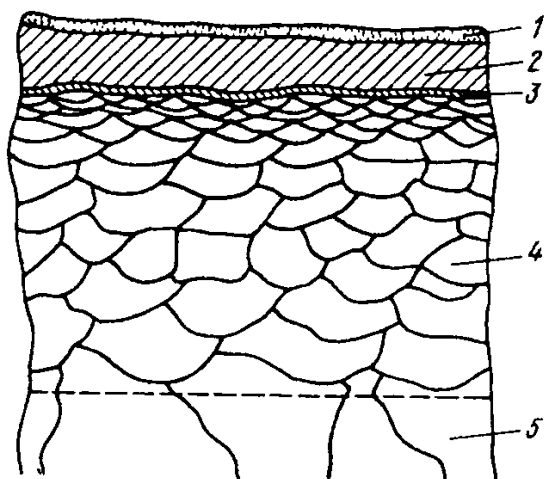


Рис. 1.4. Схема поверхностного слоя детали [59]: 1 – адсорбированная зона; 2 – зона оксидов; 3 – границная зона материалов; 4 – зона материала с измененными физико-механическими свойствами; 5 – зона материала с неизменными свойствами

На практике состояние ПС оценивается набором параметров, характеризующих его качество. Укрупнено эти параметры подразделяют на:

- микрогеометрию поверхности (высотные и шаговые параметры шероховатости);
- волнистость;

- макрогеометрию поверхности (отклонения формы и расположения поверхностей);
- физическо-механические параметры (технологические остаточные напряжения, структурно-фазовый состав, размер зерен материала, микротвёрдость и т.д.);
- химический состав.

Причем одними из наиболее важных параметров качества ПС, определяющими эксплуатационные свойства ответственных деталей машин, являются именно физико-механические параметры.

В процессе механической обработки ПС заготовки подвергается неоднородной пластической деформации, затухающей на глубине [74]. Пластическое деформирование сопровождается структурными изменениями в металле ПС. В кристаллической решетке возрастает количество дислокаций, вакансий и других дефектов решетки, ПС упрочняется вследствие наклёпа, формируются сжимающие остаточные напряжения. Изменяется форма и размеры зерен, которые измельчаются и вытягиваются у поверхности, ориентируясь в направлении силы деформирования.

С другой стороны, многие операции технологического процесса изготовления деталей (шлифование, тонкое точение и т.д.) сопряжены со значительным теплообразованием в зоне контакта инструмента с заготовкой, что может стать причиной активизации структурно-фазовых преобразования, разупрочнения металла вследствие процессов отпуска, а также формирования в ПС заготовки нежелательных технологических остаточных напряжений.

Одним из важнейших физико-механических параметров ПС являются технологические остаточные напряжения (ТОН), возникающие в процессе механической обработки и обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД). Известно, что ТОН часто оказывают определяющее влияние на износостойкость, усталостную прочность и коррозионная стойкость [2, 13, 18, 58, 59, 74].

В зависимости от объемов тела, в которых оценивают ТОН, они условно

подразделяются на [58]:

- первого рода, уравновешенные в макрообъемах тела;
- второго рода, уравновешенные в пределах размера зерен;
- третьего рода, уравновешенные в пределах нескольких межатомных расстояний.

В зависимости от характера и интенсивности физико-механических процессов, происходящих при обработке, ТОН могут иметь различный знак. В связи с этим различают сжимающие (со знаком «–») и растягивающие (со знаком «+») напряжения.

Изменение элементов режима обработки и условий обработки может приводить к повышению контактных температур и обуславливать рост растягивающих остаточных напряжений, уменьшение напряжений сжатия или превращение сжимающих ТОН в растягивающие [4, 13, 18].

Как говорилось выше, остаточные напряжения, которые образуются в ПС, оказывают значительное влияние на усталостную прочность. Причем на предел выносливости образцов влияют не только знак и величина ТОН на поверхности детали, но и эпюра их распределения по глубине ПС.

По мнению И. А. Одингга, остаточные напряжения сжатия нарушают симметрию цикла при среднем напряжении сжатия, что приводит к повышению предела выносливости и наоборот – остаточные напряжения растяжения создают асимметричный цикл при среднем напряжении растяжения, при котором снижается предел выносливости [63].

В работе [78] определяли степень влияния ТОН на усталостную прочность круглых образцов из жаропрочных сплавов ХН35ВТЮ и титанового сплава ВТЗ-1. Результаты исследований приведены в табл. 1.1, из которых следует, что растягивающие остаточные напряжения понижают предел выносливости, а сжимающие – способствуют его увеличению.

Степень влияния тангенциальных напряжений на предел выносливости примерно одинакова и может быть выражена зависимостью [78]:

$$\sigma_{-1} = \sigma_{-1\text{исх}} - k \cdot \sigma_z, \quad (1.4)$$

где σ_{-1} – предел выносливости образцов с остаточными напряжениями, МПа; $\sigma_{-1\text{исх}}$ – предел выносливости образцов при отсутствии остаточных напряжений, МПа; k – коэффициент, определяемый экспериментально ($k = 0,16$ для титанового сплава BT3-1 и $k = 0,13$ для сплава ХН35ВТЮ); σ_Z – величина касательных остаточных напряжений, МПа.

1.1. Касательные остаточные напряжения и предел выносливости [78]

Обрабатываемый материал заготовок	Касательные остаточные на- пряжения σ_Z , МПа	Предел выносливости σ_{-1} , МПа
BT3-1	-40	42
	-30	40
	-20	38
	+60	25
	-	23
ХН35ВТЮ	+109	16
	+82	20
	+42	25
	-85	42

Согласно исследованиям [78], предел выносливости цилиндрических полированных образцов из сплава ХН77ТЮР, на поверхностях которых отсутствует наклеп и остаточные напряжения, по данным исследований, составил $\sigma_{-1\text{исх}} = 380$ МПа. При этом изменение предела выносливости в зависимости от величины остаточных напряжений для образцов из сплава ХН77ТЮР выражается зависимостью:

$$\sigma_{-1} = 380 - 0,2 \cdot \sigma_Z \quad (1.5)$$

Приведенные данные свидетельствуют о преобладающем влиянии остаточных напряжений на изменение предела выносливости.

Анализ научной литературы показал, что наклеп оказывает неоднозначное влияние на предел выносливости образцов. Исследованиями [63] установлено, что

для жаропрочных сплавов при небольших степенях наклепа (3 – 10 %) и глубине упрочнения 10 – 20 мкм происходит рост прочностных свойств, который обусловлен снижением неоднородности дефектов и формированием благоприятной микроструктуры. Дальнейший рост упрочнения снижает пластичность сплавов, уменьшает трещиностойкость и, как следствие, ведет к существенному снижению усталостной прочности.

Наклёп ПС заготовки методом обкатывания значительно повышает усталостную прочность титановых сплавов (табл. 1.2). Результаты испытаний свидетельствуют, что применение обкатывания повышает предел выносливости образцов из сплава ВТЗ-1 до 34%. Повышение предела выносливости объясняется формированием не только сжимающих остаточных напряжений, но и оптимальным наклепом. Обкатывание с силой более 750 Н уменьшает усталостную прочность вследствие перенаклепа [64].

1.2. Результаты усталостных испытаний образцов из сплава ВТЗ-1 [64]

Метод обработки образцов	Усилие прижима шара P , Н	Предел выносливости σ_{-1}	
		МПа	%
Точение	-	470	100
Обкатывание шаром	500	615	131
	750	630	134

Таким образом, чрезмерная величина наклепа, приводящая к разупрочнению металла поверхностного слоя, может послужить причиной возникновения усталостной трещины. Однако упрочнение ПС до состояния, при котором сохраняются его пластические свойства, способствует повышению усталостной прочности [83].

В результате наклепа изменяются физико-механические свойства и структура металла, повышается сопротивление деформации, понижается пластичность и увеличивается микротвердость.

На рис. 1.5 показано изменение предела выносливости образцов из стали 45Х, подвергнутых различным методам обработки. Из представленных данных следует, что усталостная прочность значительно повысилась после упрочнения наклепом

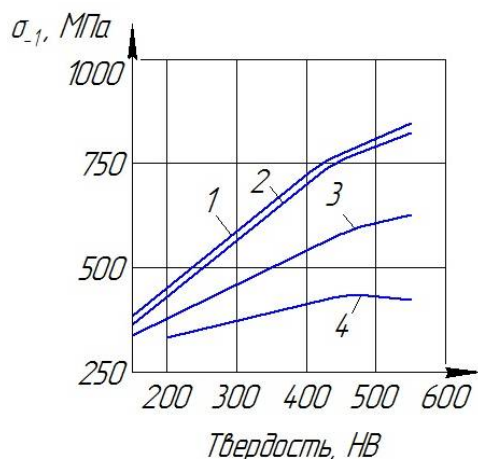


Рис. 1.5. Изменение предела выносливости образцов в зависимости от твердости и метода обработки [63]:

1 – шлифованных и упрочненных наклепом; 2 – наклепанных дробью; 3 – подвергнутых токарной обработке; 4 – шлифованных

Основными параметрами структурно-фазового состояния ПС металла являются число и концентрация фаз, распределение их по глубине ПС, тип кристаллической структуры фаз, и др.

Структурные изменения металла при механической обработке (например, прижоги) заготовок являются причиной снижения усталостной прочности деталей машин. При этом на границах участков измененной структуры образуются шлифовочные трещины, являющиеся концентраторами напряжений [71]. Предел выносливости образцов из стали 40Х с прижогом значительно ниже по сравнению с образцами без прижога (рис. 1.6).

Структурно-фазовый состав оказывает значительное влияние на долговечность и износостойкость ПС. При обработке заготовок из двухфазных сталей аустенитно-мартенситные и другие превращения в ПС приводят к возникновению неоднородности структуры по глубине, то есть к появлению структурных концентраторов напряжения, снижающих износостойкость и усталостную прочность детали [43, 78].

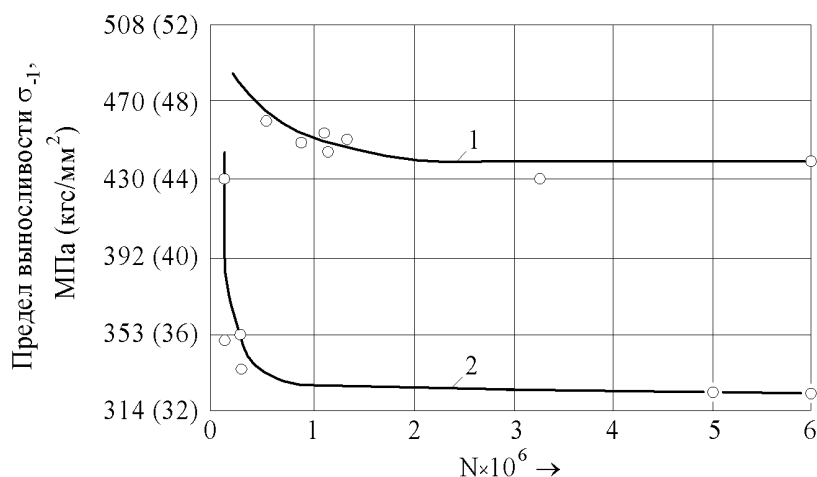


Рис. 1.6. Влияние шлифовочного прижога на предел выносливости стали 40X [71]: 1 – без прижога; 2 – с прижогом

В работе [64] показано, что наибольшее повышение усталостной прочности происходит у стали со структурой мартенсита. При испытании образцов из сталей 18Х2Н4ВА и 45ХНМФА установлена зависимость предела выносливости от силы обкатывания и структурного состояния стали (табл. 1.3).

1.3. Результаты усталостных испытаний сталей с различной структурой [64]

Сталь	Структура	σ_B	σ_{-1}	
			до обкатывания	после обкатывания
		МПа		
18Х2Н4ВА	Сорбит	985	450	530
	Троостит	1200	520	670
	Мартенсит	1460	560	840
45ХНМФА	Сорбит	1340	570	760
	Троостит	1530	620	780
	Мартенсит	2080	670	860

Результаты исследований [63] свидетельствуют, что размер зерна незначительно влияет на предел выносливости при циклических нагрузках – пределы выносливости стальных образцов с существенно различающимся размером зерен основного металла оказались примерно одинаковыми (у мелкозернистого образца выше всего на 10-12%).

Неоднородность размера зерен, различные неметаллические включения, газовые пузыри, химические соединения, наличие обезуглероженного слоя и следов коррозии на поверхности изделий также приводят к неравномерному распределению напряжений и снижают усталостную прочность детали [58].

Таким образом, обобщив представленную выше информацию, а также проанализировав работы [15, 55, 59, 63, 64, 79, 80] можно сделать вывод, что определяющее влияние на предел выносливости (усталостную прочность) деталей из труднообрабатываемых материалов среди прочего оказывают остаточные напряжения и фазовый состав материала ПС (рис. 1.7). Микротвёрдость ПС неоднородно изменяет предел выносливости и имеет преобладающее влияние в деталях из мягких и пластичных материалов, тогда как для деталей из твердых и высокопрочных материалов (коррозионно-стойкие и жаропрочные стали, титановые сплавы и др.) усталостная прочность в большей степени определяется технологическими остаточными напряжениями.

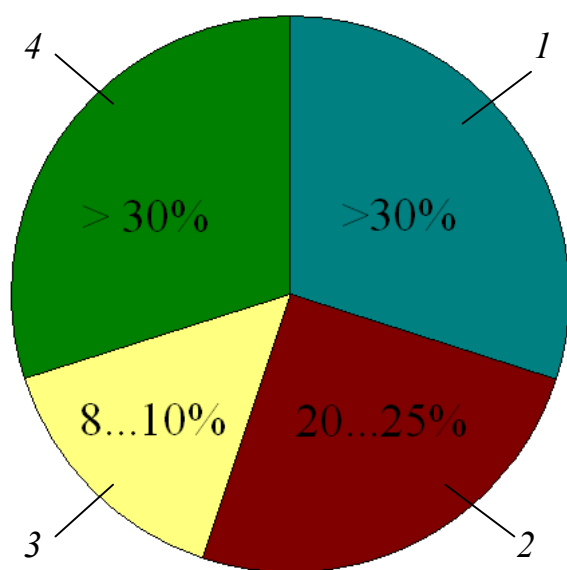


Рис. 1.7. Относительное влияние основных физико-механических свойств поверхностного слоя на усталостную прочность заготовок из труднообрабатываемых материалов: 1 - технологические остаточные напряжения; 2 - структурно-фазовый состав; 3 – размер зерен; 4 - микротвёрдость

При этом следует отметить непосредственное влияние на усталостную прочность готовых деталей не только технологии обработки заготовок в целом, но и некоторых операций, предшествующих окончательной, в частности (см. рис. 1.5). Это означает, что для обеспечения заданного уровня эксплуатационных свойств при проектировании технологического процесса изготовления детали следует устанавливать непосредственные математические зависимости между различными

технологическими операциями, то есть устанавливать параметры технологического наследования.

1.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ НАСЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛИ В ПРОЦЕССЕ ЕЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

1.2.1. Сущность явления технологического наследования

В параграфе 1.1 отмечалось значительное влияние состояния ПС деталей машин на их основные эксплуатационные свойства (на примере усталостной прочности), а также влияние вида и режимов механической обработки на отдельные параметры качества ПС. Эти параметры качества (технологические остаточные напряжения, структурно-фазовый состав и др.) формируются на протяжении всего ТП обработки заготовки. При этом отдельные характеристики способны «переходить» от операции к операции, то есть наследоваться от предыдущих операций. Следовательно, можно утверждать, что при механической обработке заготовок из труднообрабатываемых материалов имеет место технологическая наследственность.

Технологическим наследованием (ТН) называется перенесение на готовое изделие в процессе его обработки погрешностей, механических и физико-химических свойств исходной заготовки или свойств и погрешностей, сформировавшихся у заготовки на отдельных операциях изготовления изделия. Проявление ТН может привести как к улучшению, так и к ухудшению эксплуатационных свойств деталей машин.

Примером ТН служит геометрическое копирование исходных погрешностей формы детали – если на предыдущей операции заготовка имела, например, отклонение от круглости, то и на последующей операции получим то же отклонение, но меньшей величины. При выполнении ряда технологических операций форма и размеры заготовки уточняются, но исходные погрешности в некоторой степени ко-

пируются на всех операциях до окончательного получения готовой детали. В данном случае, копирование геометрических погрешностей объясняется наличием упругих отжатий в технологической системе.

ТН зависит не только от вида и режимов обработки, примененных на заключительной операции. Она проявляется в изменении свойств или потере точности формы готовой детали при ее эксплуатации в результате воздействия тех или иных элементов состояния ПС, сформированных в нем при предварительной обработке заготовок [59].

Как отмечалось выше, усталостная прочность деталей машин в значительной степени зависит от видов и режимов обработки заготовок. В работе [58] показано, что при фрезеровании заготовок из коррозионно-стойкой стали 20Х13 цилиндрическими фрезами, изменение элементов режима обработки приводит к увеличению предела выносливости с 314 до 378 МПа, то есть на 18%. При этом переход от попутного фрезерования (П на рис. 1.8) к встречному (В на рис. 1.8) с неизменным режимом фрезерования повышает усталостную прочность на 8-10%.

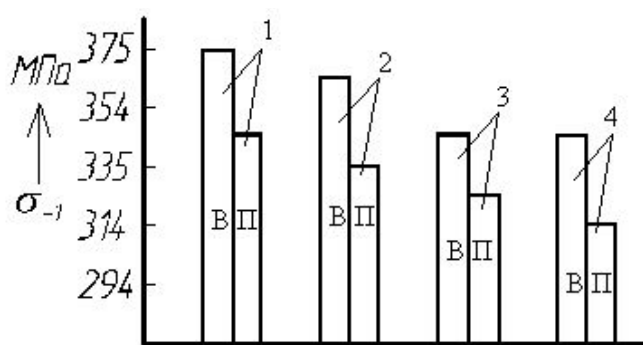


Рис. 1.8. Зависимость предела выносливости деталей из стали 20Х13 от режимов фрезерования [58]: 1, 2, 3, 4 – соответственно, окружная скорость фрезы $V = 60; 60; 38; 19$ м/мин; подача на зуб $S_z = 0,05; 0,16; 0,05; 0,12$ мм/зуб; В – встречное фрезерование; П – попутное фрезерование

Для этой же коррозионно-стойкой стали 20Х13 применение различной технологии обработки заготовок изменяет усталостную прочность с 206 до 363 МПа [59].

В параграфе 1.1 указывалось, что для целесообразного использования ТН необходимо установить непосредственные связи между эксплуатационными харак-

теристиками деталей (например, усталостной прочностью) и режимами обработки заготовок. Такие связи можно выявить с помощью математических зависимостей вида: «состояние ПС – функция режима резания» и «эксплуатационная характеристика – функция состояния ПС» с их последующим совместным решением и установлением прямой связи «эксплуатационная характеристика – функция режима резания». Последнюю зависимость можно непосредственно использовать для расчетов элементов режима резания, обеспечивающих достижение заданных эксплуатационных характеристик. Примером подобного решения может служить зависимость усталостной прочности деталей из жаропрочного сплава ХН35ВТЮ от режимов точения заготовки резцами ВК6М, выраженная номограммой, показанной на рис. 1.9 [58].

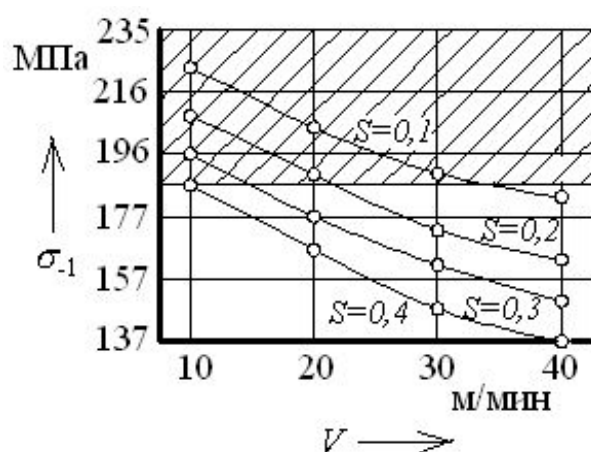


Рис. 1.9. Номограмма режимов точения, обеспечивающих заданную усталостную прочность [60]: S – подача, мм/об; V_3 – окружная скорость заготовки, м/мин; σ_{-1} – усталостная прочность, МПа

В данном случае для использования ТН для повышения предела выносливости деталей или улучшения других эксплуатационных характеристик путем назначения рациональных видов и режимов обработки заготовок необходимо экспериментально устанавливать прямые зависимости между отдельными эксплуатационными характеристиками и режимами или видами их обработки [59].

1.2.2. Использование теории графов для описания наследственных взаимосвязей

Впервые методика для описания технологического наследования параметров качества ПС была предложена А. М. Дальским [13]. На рис. 1.10 вершина A_1 гра-

фа представляет собой совокупность свойств заготовки, а вершина A_2 – те свойства, которые создаются на определенной операции обработки заготовки. Ориентированные ребра A_1C и A_2C показывают передачу (наследование) свойства в процессе обработки. Таким образом, возникает объект C со свойствами, характерными для A_1 и A_2 .

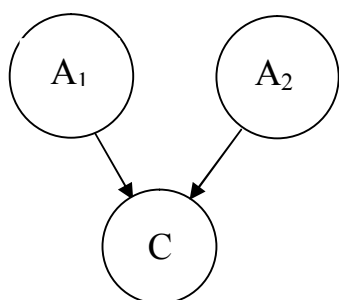


Рис. 1.10. Граф, показывающий формирование свойств объекта с учетом технологического наследования [13]

В основе графа, показывающего ТН, лежит ориентированное ребро, условно снабженное стрелкой. Именно оно указывает на передачу свойств.

1.2.3. Корреляционный анализ и методы статистической обработки экспериментальных данных для описания технологического наследования

Наряду с методом графов для иллюстрации явлений технологической наследственности может быть использован корреляционный анализ [15]. Получаемая с помощью расчетов автокорреляционная функция показывает степень наследования двух случайных величин. Например, при алмазном выглаживании можно определить влияние исходного профиля на шероховатость выглаженной поверхности. Эта задача решается на основе анализа значительного количества экспериментальных данных с использованием нормированной взаимнокорреляционной функции связи.

Использование метода корреляционного анализа требует большого количества эмпирической информации, что иногда представляет существенные трудности, особенно для оценки ТН при изготовлении высокоточных и маложестких деталей из дорогостоящих сталей и сплавов.

В настоящее время накоплено достаточно экспериментальных данных для установления частных зависимостей отдельных характеристик качества ПС от некоторых элементов режимов обработки. Получение более полных зависимостей, отображающих весь процесс обработки, затруднено сложностью постановки подобного эксперимента и его математической обработки. Использование математических методов планирования эксперимента (в частности, дисперсионного анализа) позволяет значительно упростить решение поставленных задач, а также решить еще более сложные, например, установить связь износостойкости детали с технологическими методами и режимами ее обработки. При этом целесообразнее учитывать комплексные характеристики, определяющие целый набор рассматриваемых параметров, а также параметры качества ПС, полученные после предшествующей обработки.

Для решения рассматриваемых задач применяют математические методы планирования экстремальных экспериментов. Математическая модель исследуемого процесса искалась в виде линейного уравнения, к которому логарифмированием с последующей заменой переменных приводится модель мультипликативного типа [90]:

$$y = b_0x_0 + b_1x_1 + \dots + b_kx_k \quad (1.6)$$

Вычисление коэффициентов $b_0, b_1, \dots, b_k$ математической модели (1.6) производится методом наименьших квадратов при помощи регрессионного анализа.

Развитием вышеописанного метода является методика В.А. Баумана, который предложил вместо использования комплексной характеристики параметра качества ПС учитывать влияния различных факторов как при окончательной обработке, так и при предварительной. Подобная задача была решена им при исследовании течения с последующей обработкой поверхностно-пластическим деформированием (ППД) [90].

В результате обработки экспериментальных данных В.А. Бауман получил эмпирические зависимости для шероховатости и микротвердости поверхности, а также для остаточных напряжений.

В дальнейшем использованная матрица планирования при исследовании процесса точения была дополнена переменными, характеризующими условия обработки при ППД. В итоге были получены эмпирические формулы, позволившие составить диаграмму влияния параметров качества ПС, полученной на предшествующей операции, и условий окончательной обработки на величину шероховатости после ППД (рис. 1.11).

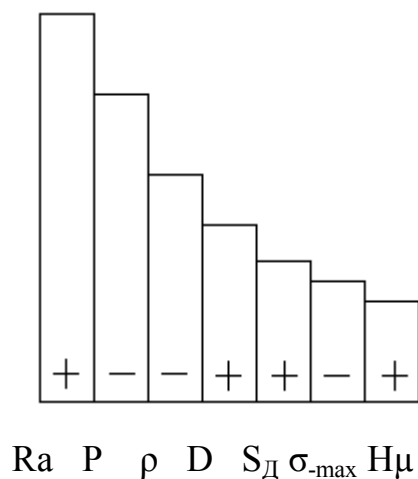


Рис. 1.11. Диаграмма влияния качества поверхности, полученной на предшествующей операции, и условий окончательной обработки на величину шероховатости после ППД [90]

Однако статистическая проверка по критерию Фишера показала неадекватность полученных моделей, что, по мнению П. И. Ящерицына [90], было связано с экстремальным характером зависимостей параметров качества ПС от режимов ППД. В дальнейшем математические модели, разработанные В. А. Бауманом, были уточнены и доработаны П. И. Ящерицыным и др.

1.2.4. Программа нагружения как инструмент для описания физических закономерностей технологического наследования

В соответствии с базовыми положениями механики технологического наследования носителем наследственной информации ПС является очаг деформации (ОД), возникающий в зоне контакта режущего или деформирующего инструмента с заготовкой и свойственный всем процессам механической обработки заготовок. Геометрические параметры очага деформации, глубина распространения, грани-

цы начала и окончания пластического течения металла позволяют сформулировать граничные и начальные условия для решения задач механики технологического наследования. Форма и размеры ОД зависят от накопленных ранее свойств материала, с одной стороны, и полностью и адекватно определяют состояние поверхностного слоя после обработки – с другой [48, 49].

По мнению В.М. Смелянского, формирование свойств ПС детали при механической обработке осуществляется в результате сложной истории нагружения частиц этого слоя при их движении относительно инструмента. Изменение тепло-силовой напряженности обработки, наличие наклёпа и другие факторы усложняют задачу [49].

Для количественной оценки истории нагружения В.Ю. Блюменштейном предложено использовать представления о программе нагружения [7].

Программа нагружения представляет собой функцию степени деформации сдвига Λ , накопленной вдоль линии тока в ОД, от показателя схемы напряженного состояния Π в виде $\Lambda = \Lambda(\Pi)$. Программа нагружения описывает накопление деформаций в условиях изменяющейся схемы напряженного состояния металла поверхностного слоя в очаге пластической деформации и состоит из квазимонотонных этапов, соответствующих определенным зонам ОД.

В. Ю. Блюменштейн считает обоснованным подход, в соответствии с которым начало разрушения при эксплуатации – это всегда исчерпание запаса пластичности. Механическая обработка резанием и поверхностно-пластическим деформированием также приводит к пластическому течению и постепенному исчерпанию запаса пластичности металла в очаге деформации, в результате чего происходит формирование поверхностного слоя. Следовательно, и механическая обработка и процессы эксплуатации – это процессы, имеющую общую физическую природу поведения металла [6, 48].

Степень исчерпания запаса пластичности – это расчетная величина, которая формируется под влиянием программы нагружения металла ПС в ОД. В.Ю. Блюменштейн предложил использовать степень исчерпания запаса пластичности в виде критерия [8]:

$$\Psi = \Psi_1 + \Psi_2 = n \cdot \varphi_0 \cdot \int_0^{\Lambda_k} \Lambda_P^{n-1} \cdot d\Lambda + \left(\int_0^{\Lambda_k} \frac{d\Lambda}{\Lambda_P} - \varphi_0 \cdot \int_0^{\Lambda_k} \Lambda_P^{n-1} \cdot d\Lambda \right), \quad (1.7)$$

где Ψ_1 – составляющая, зависящая от напряжения текучести или от накопленной деформации; Ψ_2 – составляющая, зависящая от пластичности металла в условиях $\Pi = \text{const}$; n – коэффициент деформационного упрочнения; φ_0 – коэффициент, определяемый на основе испытаний на пластичность; k – число этапов нагружения; Λ и Λ_P – накопленная и предельная степень деформации сдвига при данном показателе схемы напряженного состояния Π . В неупрочненном металле $\Psi = 0$, а при полном исчерпании запаса пластичности $\Psi = 1$.

Таким образом, в настоящее время имеется несколько существенно различающихся между собой подходов к описанию процесса технологического наследования параметров качества ПС. Результаты анализа применимости рассмотренных методик для описания ТН различных параметров качества ПС, а также выявленные существенные недостатки данных методик сведены в табл. 1.4.

1.4. Современные методики учета технологического наследования

Методика учета технологического наследования	Параметры качества ПС заготовок, к которым методика применима	Недостатки рассматриваемой методики
1. Теория графов	- микро- и макрогеометрия; - волнистость; - твердость.	В предложенном виде не применима для учета наследования ТОН
2. Методы статистической обработки данных	- микро- и макрогеометрия; - волнистость; - микротвердость; - ТОН.	Значительное количество экспериментальных данных
3. Теория накопления деформаций	- напряженно-деформированное состояние ПС	Используется для расчета после операций без снятия припуска

1.3. ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ «БАРЬЕРЫ» ДЛЯ НАСЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ЗАГОТОВОК ИЗ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИХ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

1.3.1. Понятия о «барьерах» в технологических процессах изготовления деталей

В работе [58] отмечается, что влияние одних параметров качества ПС распространяется вплоть до самой последней операции ТП изготовления детали, влияние других угасает значительно раньше – они частично копируются на одной-двух смежных операциях, а затем влияние исходной величины этих параметров прекращается. Кроме того, имеются факторы, которые действуют только в пределах своей операции, не «переходя» на последующую.

Это указывает на наличие в технологическом процессе так называемых «барьеров» для наследования, ограничивающих (ослабляющих или полностью прекращающих) влияние свойств и параметров качества ПС заготовки, полученных на начальных этапах ТП, на свойства и параметры качества ПС готовой продукции.

Основными «барьерами» для наследования таких параметров качества, как ТОН и ФС служат термические операции (например, низкотемпературный отпуск, отжиг, стабилизирующее старение, частичная или полная аустенитизация) и операции поверхностного пластического деформирования (например, обкатка роликами и шариками, алмазное выглаживание и др.) [59].

ППД не только позволяет создавать в ПС заготовки сжимающие остаточные напряжения и выровнять микротвёрдость, но и изменить фазовый состав материала, так как избыточное давление в зоне контакта индентора с заготовкой способствует некоторым фазовым переходам (распаду аустенита в двухфазных сталях или обратному $\beta \rightarrow \alpha$ переходу в сплавах на основе титана). Исследования [90] показали, что аналогичное влияние на параметры качества ПС поверхностей можно получить при помощи процесса выхаживания, при этом в зоне контакта круга с

заготовкой протекают те же процессы, что и в случае проведения специальных упрочняющих операций. Однако для этого ПС детали необходимо подвергнуть значительному силовому воздействию (достигающему 750-1000Н при обкатке шаром и 300-500Н при алмазном выглаживании), что может оказаться неприемлемым, особенно в случае маложестких и тонкостенных деталей.

П.И. Ящерицын в своих работах также показал, что многие отрицательные факторы технологического наследования при осуществлении упрочняющих операций резко ослабевают или даже прекращают свое действие [90].

Как было показано в параграфе 1.1, некоторые структурно-фазовые превращения (в частности, прижоги) могут иметь глубину залегания, превышающую величину припуска на последующую операцию, и оказывать отрицательное влияние на формирование эксплуатационных характеристик готовой детали. Однако, управляя тепловыми процессами (применяя новые виды инструмента, схемы обработки, СОЖ и т.д.) можно в некоторой степени управлять и явлением технологического наследования.

Следовательно, при проектировании технологических процессов необходимо вводить такие операции, которые создавали бы больше препятствий прохождению к операции окончательной обработки отрицательных факторов.

1.3.2. Релаксация остаточных напряжений

Еще в первой половине прошлого столетия было отмечено уменьшение напряжений с течением времени. К. Максвелл предположил, что степень релаксации напряжений в функции времени пропорциональна величине напряжения. Он рассматривал твердое тело как упруго-вязкую систему, сочетающую в себе идеально упругое тело Гука и идеально вязкое тело Ньютона. Помимо модели Максвелла (рис. 1.12, а), состоящей из последовательно соединенных упругого E и вязкого η элементов, для описания процессов ползучести используют модель Кельвина-Фойгта (рис. 1.12, б), состоящую из параллельно соединенных элементов E и η , а также комбинации моделей Кельвина-Фойгта, Максвелла и упругих элементов.

При описании ползучести и релаксации, согласно комбинированной гипотезе ползучести, используется модель, предложенная Е. А. Хейном (рис. 1.12, в). Она состоит из звена Максвелла, описывающего необратимую ползучесть, и совокупности звеньев Кельвина-Фойгта, моделирующих упругое последствие [9].

Н.С. Курнаков рассматривал процесс релаксации напряжений в тесной связи

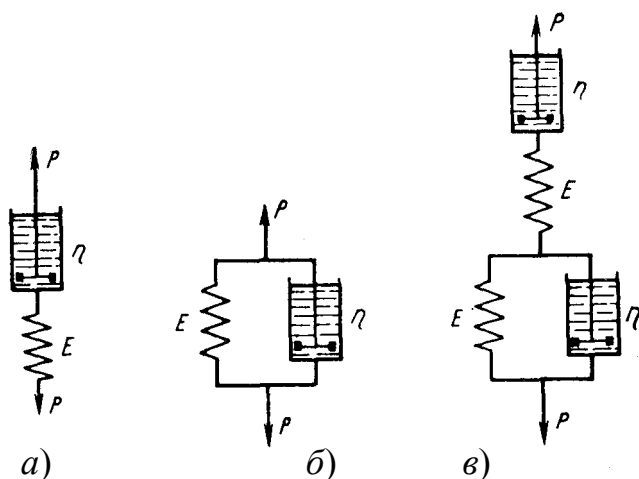


Рис. 1.12. Модели твердого тела: а - Максвелла; б – Кельвина-Фойгта; в - Хейна

с природой и свойствами испытуемого материала и его состоянием. Он пришел к выводу, что скорость релаксации k (а, следовательно, и время релаксации τ_0) зависят не только от внешних условий (температуры, давления и др.), но и от природы металла и его предварительной обработки [9].

Н.С. Курнаков придавал большое значение релаксации напряжений и даже включил «время релаксации» в число свойств, определяемых при физико-химическом анализе металлов и сплавов.

Впоследствии С.И. Губкин [24] высказал мысль, что в поликристаллическом металле скорость релаксации напряжений зависит от скорости межзеренных скольжений и внутрикристаллических сдвигов. Это положение было позднее развито и значительно дополнено И.А. Одингом, утверждавшим, что скорость процессов релаксации прежде всего является функцией состояния самого вещества.

Как уже упоминалось, релаксация напряжений – процесс самопроизвольного снижения напряжений в теле, поставленном в условия неизменности начальной деформации в направлении действия силы. Эти напряжения могут быть специально созданы при сборке узлов машин или приборов, например болтовые соединения, цилиндрические и ленточные пружины, сохраняющие свои размеры в процессе работы, различные тугие посадки и т.д., а также находящий все более ши-

рокое применение напряженный бетон, армированный предварительно напряженной проволокой. Во всех этих случаях желательно возможно дольше сохранить близкий к начальному уровень напряжений и поэтому их релаксация нежелательна.

Как отмечалось в параграфе 1.1, в процессе обработки заготовок в их ПС могут возникать нежелательные растягивающие остаточные напряжения. В качестве примера можно привести сварные соединения, тонкостенные титановые заготовки после шлифования и др. Такие напряжения могут вызвать во время службы недопустимое формоизменение детали или даже привести к ее разрушению. Поэтому следует создавать такие условия, чтобы релаксация технологических напряжений проходила с возможно большей интенсивностью.

Релаксация напряжений в чистом виде проявляется при постоянной начальной суммарной деформации. Основное условие релаксации (в упругой области) можно выразить соотношением [32]:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_y + \varepsilon_r = \text{const} , \quad (1.8)$$

где ε_0 – начальная суммарная деформация; ε_y – упругая деформация; ε_n – остаточная (пластическая) деформация, накапливающаяся в процессе релаксации.

Если тело было нагружено в упругой области, то в начальный момент времени (τ) $\varepsilon_0 = \varepsilon_y$ и $\varepsilon_n = 0$.

Условие постоянства начальной суммарной деформации справедливо только в случае мгновенного первичного нагружения тела в упругой области с последующей релаксацией напряжений. Если нагружение производить замедленно, то при этом в результате релаксации напряжений может возникнуть пластическая деформация. Пластическая деформация происходит и в случае нагружения тела выше предела упругости. Таким образом, более строгое условие постоянства начальной суммарной деформации следует записать [32]

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_o + \varepsilon_r + \varepsilon_{re} = \text{const} , \quad (1.9)$$

где ε_{nl} – пластическая деформация, возникающая при нагружении детали.

С течением времени в нагруженном теле, поставленном в условии неизменности начальной суммарной деформации, упругая деформация снижается и соот-

ответственно этому растет пластическая деформация. Уменьшение упругой деформации (упругих искажений кристаллической решетки) влечет за собой снижение (релаксацию) напряжений. Это наглядно показано на рис. 1.13, а, на котором дана схема уменьшения упругой деформации и соответственного роста пластической, а на рисунке 1.13, б — кривая релаксации напряжений [32].

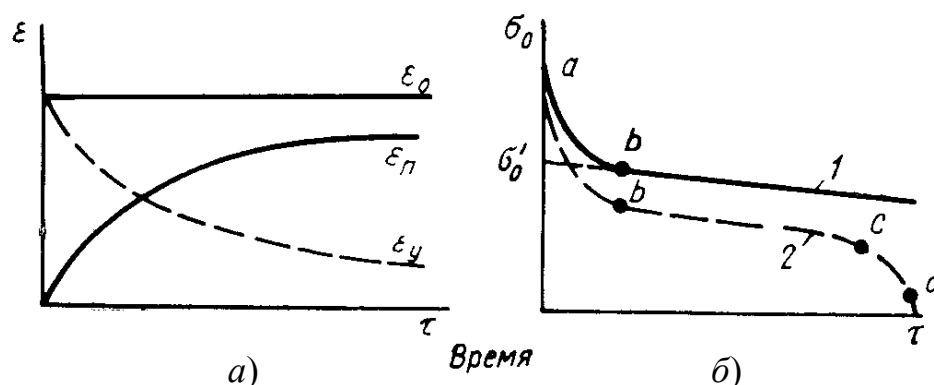


Рис. 1.13. Схема изменения пластической и упругой деформаций: а) из начального напряжения; б) в процессе релаксации; 1 – типичная зависимость σ – τ ; 2 – возможная форма кривой для сплава со структурными превращениями; а–b – первый период; b–c – второй период; c–d – третий период релаксации

Ряд закономерностей процесса релаксации напряжений был установлен на монокристаллах. Протекание процессов релаксации напряжений в поликристаллическом металле вследствие наличия границ зерен осуществляется более сложным образом. Например, в поликристаллических металлах при определенных силовых и температурных условиях возникает напряженное состояние за счет упругих смещений по границам зерен. Поэтому возможно также и снятие напряжений путем релаксации по границам зерен. Оно может происходить двумя путями — либо путем направленного смещения атомов через границы (диффузионная пластичность), либо в результате скольжения по границам зерен.

Характер возрастания пластической деформации во времени при ползучести в различных температурных интервалах имеет определенные особенности. В зависимости от температуры различают три разновидности этого процесса. Такой подход, по-видимому, можно распространить и на процесс релаксации:

1. Низкотемпературная релаксация — при температурах ниже температуры возврата (для чистых металлов ниже $0,25 T_{пл}$).

В этой температурной области деформация растет во времени, подчиняясь приблизительно логарифмическому закону:

$$\varepsilon = \alpha \ln \tau + \beta, \quad (1.10)$$

где α и β — постоянные.

Поэтому сам процесс роста деформации можно назвать логарифмическим. Пластическая деформация в этом случае обусловливается скольжением дислокаций по плоскостям сдвига. Упрочнение, согласно Мотту-Набарро и Коттреллу [46], происходит в результате непрерывного истощения дислокаций, находящихся в условиях наиболее легкого скольжения.

2. Среднетемпературная релаксация наблюдается в области температур $[(0,25-0,5) T_{пл}]$, при которых активно развиваются процессы возврата, а ближе к верхнему уровню температур — рекристаллизации. Основные процессы, контролирующие ход релаксации напряжений — переползание краевых дислокаций и двойное поперечное скольжение, благодаря которым происходит разупрочнение металла. Диффузионные процессы вызывают переползание дислокаций из одной (заблокированной) плоскости скольжения в другую (незаблокированную). Скорость релаксации в этой температурной области находится в экспоненциальной зависимости от энергии активации.

3. Высокотемпературная релаксация наблюдается при температурах (выше $0,5 T_{пл}$), при которых активизируются процессы диффузии. В этой области преобладает вакансионный механизм диффузии, что приводит к ускорению переползания дислокаций. При малых напряжениях энергия активации миграции вакансий определяет интенсивность процесса деформации. При больших напряжениях и в этом интервале температур деформация обусловлена движением дислокаций. Однако, поскольку большинство дислокаций выходит на поверхность кристалла, это не сопровождается заметным упрочнением.

Из всего вышеизложенного следует, что для обеспечения заданного качества ПС деталей из труднообрабатываемых материалов, обработанных на теплонапря-

женных операциях, необходимо тем или иным способом снимать растягивающие остаточные напряжения. Однако, реализация существующих технологий и традиционных способов снятия (релаксации) остаточных напряжений, таких как низкотемпературный отпуск, естественное и искусственное старение, сопряжена со значительными материальными, временными и энергетическими затратами. Применение же методов ППД (обкатки шариками и роликами, алмазное выглаживание) крайне ограничено жесткостью заготовок и наличием у них тонкостенных элементов, которые могут быть деформированы в ходе упрочнения.

1.4. ОСОБЕННОСТИ И МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

Впервые на возможность применения ультразвука (УЗ) для снятия остаточных напряжений в ПС металлов указал Л. Бергман [5]. Он связывал этот эффект с обнаруженным экспериментально «расшатыванием» кристаллической структуры металлов под воздействием ультразвуковых колебаний (УЗК), что, в свою очередь, приводит к релаксации остаточных напряжений.

В дальнейшем исследования, связанные с развитием теории дислокаций и дислокационных представлений в теории обработки металлов, показали, что при воздействии УЗК на металл, энергия УЗ волны поглощается дислокациями и преобразуется в энергию перемещения этих дислокаций, вызывая развитие внутризерновых деформаций, что способствует пластическим сдвигам, уменьшающим остаточные напряжения [32].

В своей работе [11] И.К. Вагапов установил, что УЗ-релаксация для различных материалов происходит на глубине ПС до 10...12 мм. Причем наиболее интенсивное снижение величины ТОН наблюдается в зоне так называемой «импульсной» релаксации на глубине ПС до 5 мм (рис. 1.14). В этой зоне снимается до 70% от исходного значения остаточных напряжений.

Исследованиями [5] установлено, что частотная зависимость дислокационного поглощения энергии УЗК имеет резонансный характер, а собственная резонансная частота дислокации определяется расстоянием между точечными дефектами. Это свидетельствует о том, что УЗК фиксированной частоты воздействуют лишь на дислокационные отрезки определенной длины, а для вовлечения в процессы дислокационного поглощения и перемещения дислокационных отрезков разной длины необходимо изменять частоту УЗК.

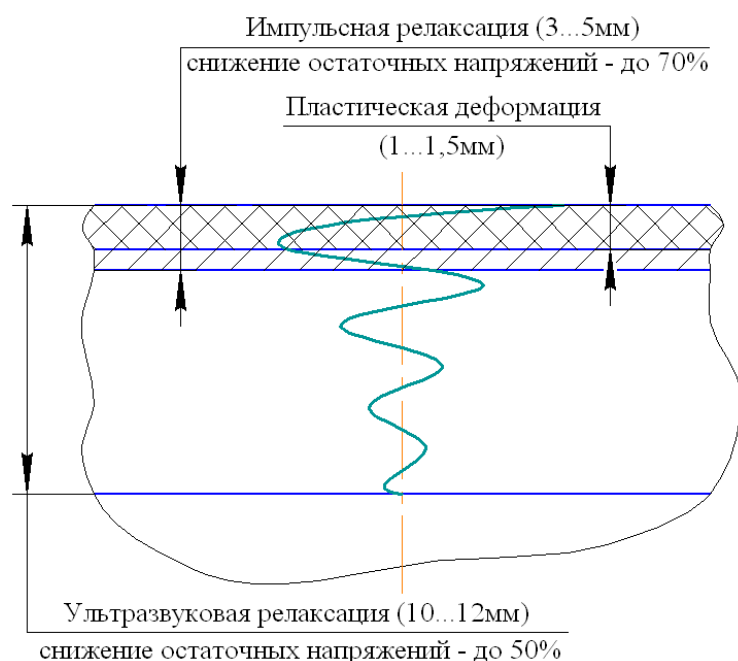


Рис. 1.14. Физические зоны влияния ультразвуковой обработки [11]

На практике это реализуется путем использования частотно-модулированных УЗК [32], в результате чего наблюдается интенсификация пластических сдвигов и релаксации технологических остаточных напряжений в ПС детали.

Графики распределения ТОН по глубине ПС плоского образца из стали 3Х3МЗФ в зависимости от продолжительности УЗ релаксации и усилия прижима сферического

индентора приведены на рис. 1.15. Результаты показали высокую эффективность использования модулированных УЗК для атермического снятия остаточных напряжений, позволяя значительно повысить производительность снижения абсолютного значения ТОН в ПС заготовок из различных материалов, в том числе и труднообрабатываемых.

Наложение УЗ-колебаний на заготовку осуществляется с помощью специализированных приспособлений, состоящих из генератора сигнала ультразвуковой частоты и преобразователя – пьезокерамического или магнитострикционного.

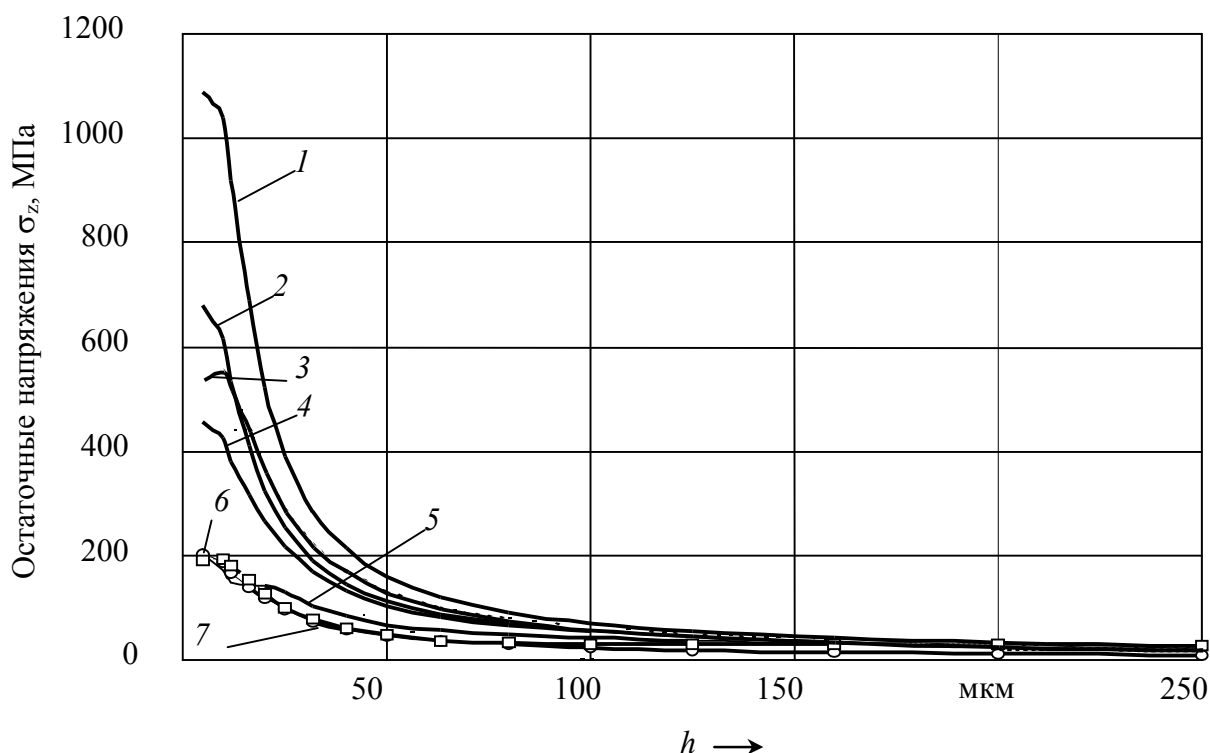


Рис. 1.15. Распределение остаточных напряжений σ_z в ПС образцов из стали 3Х3М3Ф [32]: 1 – после шлифования; 2, 3 – после ультразвуковой релаксации в течение 1 мин с усилием прижима волновода соответственно 10 Н и 50 Н; 4, 5 – то же в течение 3 мин; 6, 7 – то же 8 мин. Режим шлифования: $V_k = 35$ м/с, $V_{np} = 10$ м/мин, $S_{поп} = 4,2$ мм/ход, $S_{вр} = 0,01$ мм/дв.ход. Режим УЗ-релаксации: синусоидальные частотно-модулированные колебания, $f = 18,6$ кГц; $A = 5$ мкм

За последние годы на кафедре «Технология машиностроения» УлГТУ разработана широкая гамма устройств для ультразвуковой релаксации, которые конструктивно предназначены для ручного использования или крепления к металлообрабатывающему оборудованию (рис. 1.16).

Таким образом, УЗ-релаксация ТОН является перспективным способом формирования заданных свойств ПС деталей машин, обеспечивая высокую интенсивность снятия остаточных напряжений и отличаясь от известных способов (термообработки, естественного старения и др.) малыми временными и энергетическими затратами.

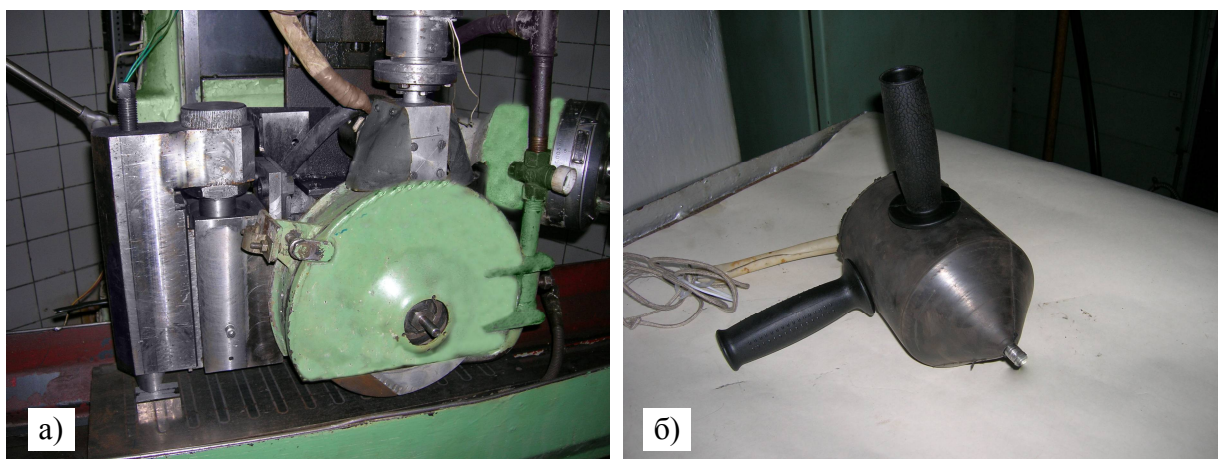


Рис. 1.16. Устройства для атермического снятия технологических остаточных напряжений, выполненные в стационарном (а) и переносном (б) исполнениях [32]

Однако, усилия прижима индентора, достигающие до 50Н (см. рис. 1.16), не позволяют использовать данный способ снятия остаточных напряжений при обработке маложестких и тонкостенных заготовок, где подобные воздействия способны привести к недопустимым деформациям и искажению формы.

Ещё одним существенным недостатком описанного выше способа снятия ТОН является большая длительность обработки при релаксации напряжений, особенно в ПС деталей сложной геометрической формы.

Данную проблему пытались решить различными путями. М.М. Ганиев [12] для релаксации ТОН в сварных швах, имеющих сложный профиль и многочисленные наплывы, предлагал использовать специализированный многобойковый инструмент (рис. 1.17), в котором в качестве инденторов выступало большое количество свободноперемещающихся бойков со сферическим торцем.

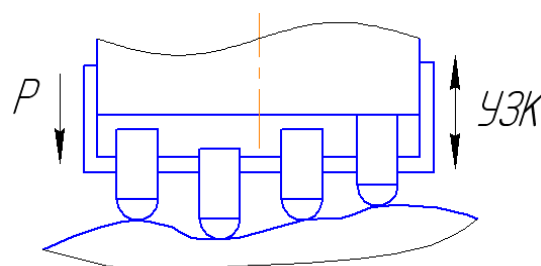


Рис. 1.17. Многобойковый инструмент для релаксации ТОН [12]

В результате при обработке сложнопровфильной поверхности хотя бы один из бойков оказывается «зажат» между концентратором и заготовкой. Однако, существенным недостатком данного спо-

соба УЗ-релаксации, на наш взгляд, является невозможность обеспечения гарантированной эффективности снятия ТОН за счет непостоянного контакта бойков с обрабатываемой поверхностью и, как и в предыдущем случае, использование индентора со сферической рабочей частью, что может послужить причиной деформирования тонкостенной заготовки при больших усилиях прижима многобойкового инструмента.

Е.С. Киселевым и Е.Н. Лексиним для этой же цели использовали ультразвуковую ванну (рис. 1.18), в которую заготовка помещалась совместно с малоразмерными телами (абразивом, дробью, шариками), предназначенными для передачи энергии УЗК от торца излучателя ко всем поверхностям заготовки. Несмотря на очевидные преимущества релаксации в УЗ-ваннах, их использование сопряжено с некоторыми недостатками. В частности, необходимость снятия со станка перед помещением в ванну может послужить причиной искажения пространственной ориентации тонкостенных и маложестких заготовок.

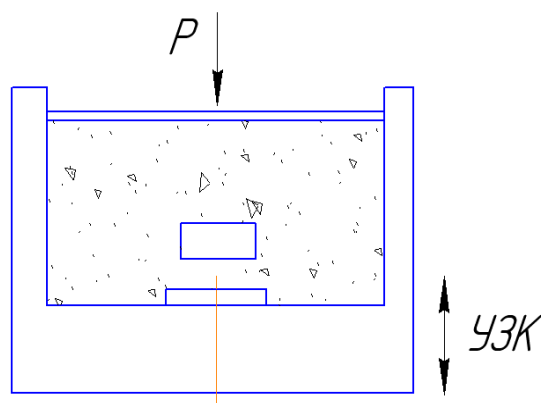


Рис. 1.18. Релаксация остаточных напряжений в ультразвуковой ванне

Другим перспективным направлением использования энергии УЗК для формирования заданного уровня ТОН и ФС материала поверхностного слоя является наложение колебаний на деформирующий элемент (индентор) в процессе ППД (например, алмазного выглаживания). Как правило, выглаживание осуществляют после окончательной обработки, на которой обеспечиваются требуемая форма и размеры готовой детали с учетом операцион-

ного припуска под выглаживание величиной порядка нескольких микрон.

Наложение УЗК позволяет не только пластифицировать материал обрабатываемой заготовки (несколько уменьшив предел текучести σ_T) и уменьшить потери на внутреннее трение, но и снизить коэффициент трения между индентором и заготовкой за счет прерывистого контакта. Тем самым происходит перераспределение энергии (снижение потерь на процессы трения, и увеличение энергии, затра-

чиваемой на деформирование материала ПС) в процессе алмазного выглаживания, баланс которой может быть представлен в следующем виде [32]:

$$E_3 = E_{\text{тр}} + E_{\text{д}} \pm E_{\text{вн}}, \quad (1.11)$$

где $E_3 = P V \tau$ – затраченная энергия, Дж; P – сила выглаживания, Н; V – скорость выглаживания, м/с; τ – продолжительность выглаживания, с; $E_{\text{тр}}$ – работа трения в зоне контакта инструмента с заготовкой, определяемая преимущественно касательной и осевой составляющими силы выглаживания, Дж; $E_{\text{д}}$ – работа, связанная с упругим и пластическим деформированием ПС заготовки и определяемая преимущественно радиальной составляющей силы выглаживания, Дж; $E_{\text{вн}}$ – внутренняя энергия, накапливаемая ПС в процессе деформационного упрочнения, либо теряемая им в процессе разупрочнения (перенаклепа) в зависимости от степени деформации, Дж.

Таким образом, наложение УЗК на индентор в процессе ППД позволяет формировать в ПС обработанных заготовок значительно большие по абсолютной величине сжимающие ТОН по сравнению с обычным выглаживанием.

Исследования [32, 55, 57, 62] свидетельствуют о возможности совмещения выглаживания с наложением УЗК и операции точения или круглого наружного шлифования с продольной подачей. Сущность данного способа комбинированной обработки представлена на рис. 1.19. Подобные комбинированные технологии позволяют существенно сократить штучное время изготовления ответственных деталей, за счет исключения из ТП отдельной операции ППД.

Результаты экспериментальных исследований [32] характера и величины сформированных в ПС заготовок из сталей 45 и Р18 при различных технологиях обработки, в том числе и комбинированной, приведены на рис. 1.19.

Вместе с тем, широкому внедрению выглаживания в промышленность препятствует сравнительно невысокая производительность, лимитируемая низкой теплостойкостью алмазного инструмента.

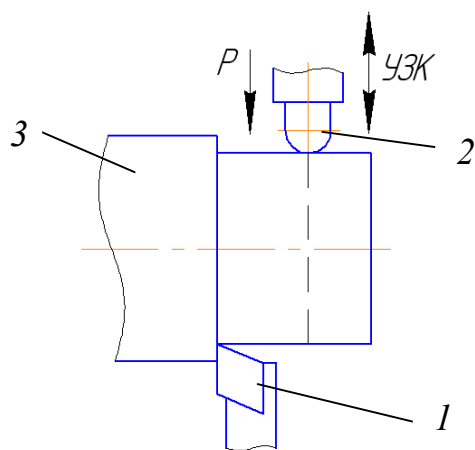


Рис. 1.19. Схема комбинированной обработки точением и алмазным выглаживанием с наложением УЗК: 1 – резец; 2 – выглаживатель; 3 – заготовка

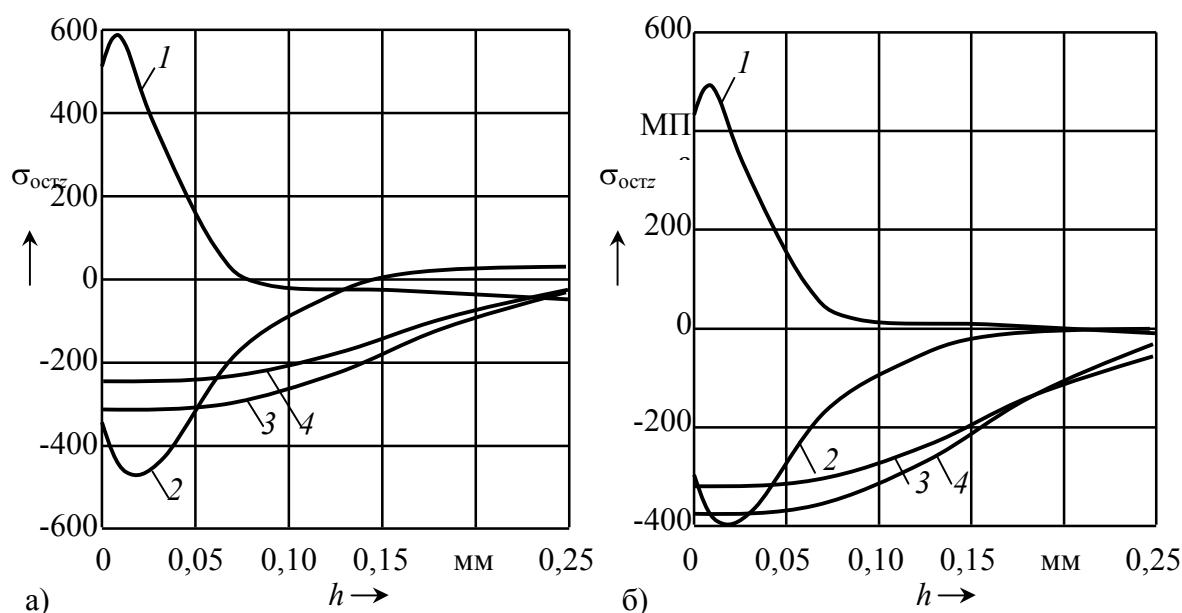


Рис. 1.20. Эпюры технологических остаточных напряжений по глубине ПС заготовок из стали 45 (а) и Р18 (б) при различных технологиях обработки [32]: 1 – шлифование; 2 – выглаживание с применением немодулированных колебаний; 3, 4 – совмещенная обработка шлифованием и УЗ выглаживанием с применением соответственно модулированных и немодулированных колебаний

Другим негативным фактором использования алмазного выглаживания с наложением УЗК является формируемая в процессе ППД волна вытесняемого материала, характеризующейся повышенным образованием дефектов и разупрочнением ПС [74].

1.5. ВЫВОДЫ. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ априорной информации показал, что на эксплуатационные свойства (например, усталостную прочность, коррозионную стойкость и т.д.) ответственных деталей, изготовленных из труднообрабатываемых материалов, существенное влияние оказывают физико-механические параметры качества ПС, основными из которых являются остаточные напряжения, микротвердость, структурно-фазовый состав, размер зерен материала и др.

Установлено существенное влияние параметров качества ПС, сформированных в ходе предварительной обработки заготовок из труднообрабатываемых сталей и сплавов, на долговечность и надежность детали. Сложность процессов, при которых проявляется технологическое наследование, требует глубокого теоретического и экспериментального изучения сущности рассматриваемых явлений. Следовательно, изучение закономерностей проявления технологического наследования позволит в определенной степени управлять ТП и тем самым поможет наиболее рациональными методами достичь оптимальной долговечности деталей машин и повышения надежности их работы. Существующие методы описания и учета технологического наследования позволяют с достаточной для инженерных расчетов точностью определять параметры качества после окончательной обработки, однако все они имеют некоторые недостатки. Методика А. М. Дальского и применение статистического анализа экспериментальных данных (В. А. Бауман, П. И. Ящерицын), на взгляд автора, являются наименее универсальными и требующими большого количества опытных данных. Учет наследования с использованием теории накопления деформации (В. М. Смелянский) более универсален, однако на практике применим лишь к операциям механической обработки без снятия припуска, что существенно сужает область использования данной методики.

В параграфе 1.4 представленной диссертации показаны преимущества использования энергии УЗК на различных операциях ТП изготовления ответственных деталей из труднообрабатываемых материалов. При УЗ релаксации остаточ-

ных напряжений, например, их абсолютная величина снижается, а при комбинированном точении или шлифовании и ультразвуковом алмазном или твердосплавном выглаживании растягивающие напряжения преобразуются в остаточные напряжения сжатия. В обоих случаях эксплуатационные свойства деталей машин улучшаются.

Кроме того, совмещение в одной операции как резания, так и ППД позволяет сократить штучное время изготовления деталей, за счет исключения из ТП обработки ответственных деталей типа тел вращения окончательной операции ППД. Таким образом, эффективно в качестве предварительной обработки применять, например, комбинированное точение и ультразвуковое твердосплавное выглаживание, создавая требуемые сжимающие ТОН на глубине припуска под последующую обработку.

Стоит отметить, что, несмотря на высокую эффективность атермического снятия ТОН с применением УЗК, относительно длительное время, необходимое для эффективной релаксации ТОН, вызывает сложности с введением данного вида обработки в ТП изготовления деталей, поэтому необходимо разрабатывать и применять новых методов и средств УЗ релаксации.

Целью исследований является повышение эффективности механической обработки заготовок из труднообрабатываемых сталей и сплавов путем рационального применения энергии ультразвукового поля на основе использования процесса технологического наследования и направленного формирования технологических остаточных напряжений и фазового состава поверхностного слоя.

Для этого следует решить комплекс задач:

- 1) Установить основные причины, препятствующие повышению эффективности изготовления деталей из труднообрабатываемых материалов на современных обрабатывающих центрах;
- 2) Выявить основные методы обеспечения заданного уровня технологических остаточных напряжений и фазового состава при изготовлении деталей из труднообрабатываемых материалов;

3) Выполнить анализ современных подходов учета и математического описания технологического наследования параметров качества поверхностного слоя заготовок из труднообрабатываемых материалов;

4) Провести теоретико-экспериментальные исследования процесса формирования технологических остаточных напряжений и фазового состава поверхностного слоя заготовок из труднообрабатываемых материалов с учетом технологического наследования;

5) Предложить новые способы обработки заготовок с наложением энергии ультразвукового поля для направленного формирования технологических остаточных напряжений и фазового состава поверхностного слоя и определить технологическую эффективность их использования;

6) Разработать технологические рекомендации по применению новых способов обработки с наложением ультразвукового поля для направленного формирования параметров качества поверхностного слоя деталей из труднообрабатываемых сталей и сплавов;

7) Выполнить расчет ожидаемой экономической эффективности от внедрения результатов теоретико-экспериментальных исследований в действующее производство.

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛИ ПРИ ЕЁ ИЗГОТОВЛЕНИИ

2.1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Как следует из материалов первой главы настоящей диссертации, наиболее простой и универсальной методикой учета технологического наследования остаточных напряжений при разработке технологических процессов изготовления деталей, является методика, предложенная А. М. Дальским [14]. По этой методике значение любого параметра качества ПС детали после выполнения очередной технологической операции определяется как произведение значения этого параметра качества, сформированного в ходе предыдущей операции, на коэффициент наследования K_H . В дальнейшем было предложено [14, 90] разделять формируемые значения параметров качества на два «компонента»: наследуемый с i -ой (предыдущей) операции и формируемый в ходе $(i+1)$ -ой (последующей) операции ТП, что позволило увеличить точность производимых расчетов.

Общеизвестно, что на формирование ТОН наибольшее влияние оказывает теплосиловая напряженность механической обработки и физико-механические свойства самого обрабатываемого материала, определяющие структурно-фазовые изменения в ПС заготовки. Однако, на наш взгляд, необходимо также учитывать, что в ходе $(i+1)$ -ой технологической операции обработки заготовок типа тел вращения часть материала ПС снимается с припуском, а следовательно, физико-механические свойства, сформированные в снимаемом слое материала, не оказывают существенного влияния на свойства вновь образуемого ПС заготовки или готовой детали.

Поэтому, для расчета величины ТОН с учетом технологического наследования можно предложить использовать следующее выражение:

$$\sigma_{i+1}(h_A) = K_H \cdot \sigma_i(Z_{i+1} + h_A) + \sigma_{i+1}^{TC}(h_A), \quad (2.1)$$

где h_A – глубина поверхностного слоя, на которой требуется определить значение остаточных напряжений, сформированных в ходе $(i+1)$ -ой операции, мкм; Z_{i+1} – припуск, снимаемый на $(i+1)$ -ой операции, мкм; $\sigma_i(Z_{i+1} + h_A)$ – значение остаточных напряжений после i -ой операции ТП на глубине $(Z_{i+1} + h_A)$, МПа; $\sigma_{i+1}^{TC}(h_A)$ – значение остаточных напряжений на рассматриваемой глубине h_A , обусловленная теплосиловой напряженностью $(i+1)$ -ой операции, МПа.

Графически схему технологического наследования ТОН в ПС цилиндрических заготовок можно представить в виде, показанном на рис. 2.1.

Коэффициент наследственности K_H является одним из оценочных критериев технологического наследования, определяющих степень влияния параметров качества ПС, которые получены на этапе предварительной технологической операции обработки заготовки, на параметры готовой детали.

Необходимо отметить, что в зависимости (2.1) учитывается значение ТОН на глубине $(Z_{i+1} + h_A)$. Однако, при некоторых видах обработки (например, при шлифовании) часть зерен, участвующих в процессе обработки, не режут, а пластически деформируют материал заготовки. Следовательно, нельзя утверждать, что весь припуск, подлежащий снятию инструментом с заготовки, будет полностью удален. Некоторый объем материала припуска пластически деформируется и будет частью вновь образованного ПС, который в свою очередь будет деформироваться и упрочняться.

Таким образом, ТОН, возникшие в ПС заготовки на i -ой операции ТП на некоторой глубине, меньшей величины припуска Z_{i+1} , тоже будут оказывать влияние на величину ТОН в готовой детали. Этот процесс носит название суперпозиции или наложения зон наклепов.

Схема для определения величины ТОН в поверхностном слое детали с учетом пластического деформирования части припуска приведена на рис. 2.2.

Определить глубину деформируемого на этапе шлифования ПС можно на примере резания-царапания единичным абразивным зерном (а.з.). Известно, что процесс поверхностно-пластического деформирования (ППД) абразивными зер-

нами шлифовального круга происходит при выполнении следующего неравенства [32]:

$$0,01 \leq a/r_{a.z.} \leq 0,5, \quad (2.2)$$

где a – глубина внедрения единичного зерна, мм; $r_{a.z.}$ – радиус зерна, мм.

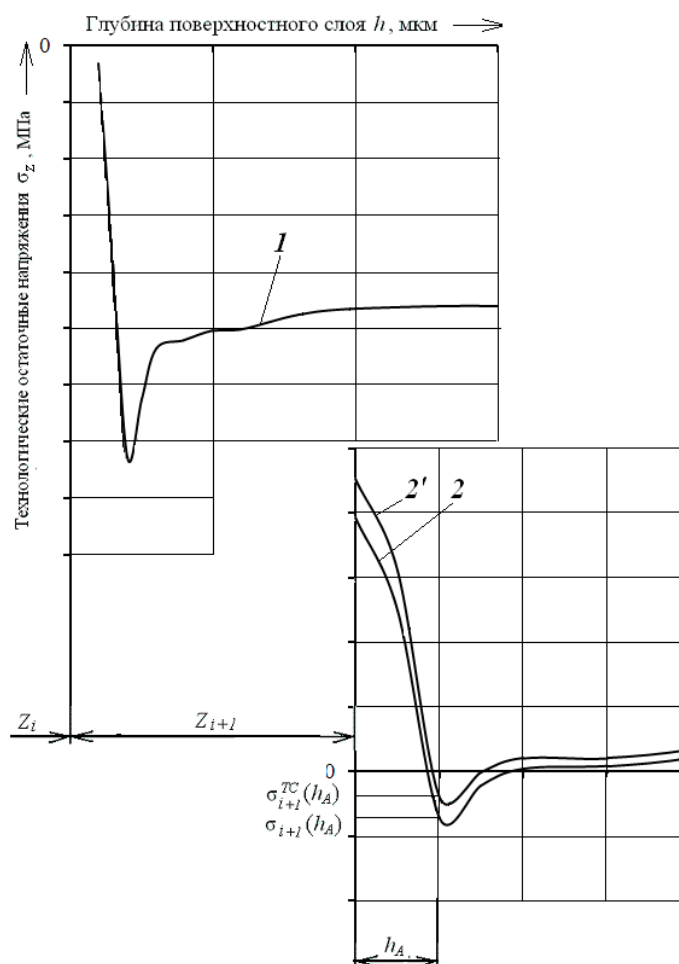


Рис. 2.1. Схема определения ТОН в ПС детали после обработки с учетом технологического наследования: Z_i – припуск, снимаемый на i -ой операции технологического процесса изготовления детали, мм; $\sigma_{i+1}(h_A)$ – реальная величина остаточных напряжений после $(i+1)$ -ой операции на исследуемой глубине h_A , МПа; 1 – эпюра остаточных напряжений, сформировавшихся в поверхностном слое заготовки в ходе i -ой операции; 2 – эпюра остаточных напряжений, сформировавшихся в поверхностном слое заготовки в ходе $(i+1)$ -ой операции; $2'$ – эпюра ожидаемых остаточных напряжений, обусловленных теплосиловой напряженностью $(i+1)$ -ой операции

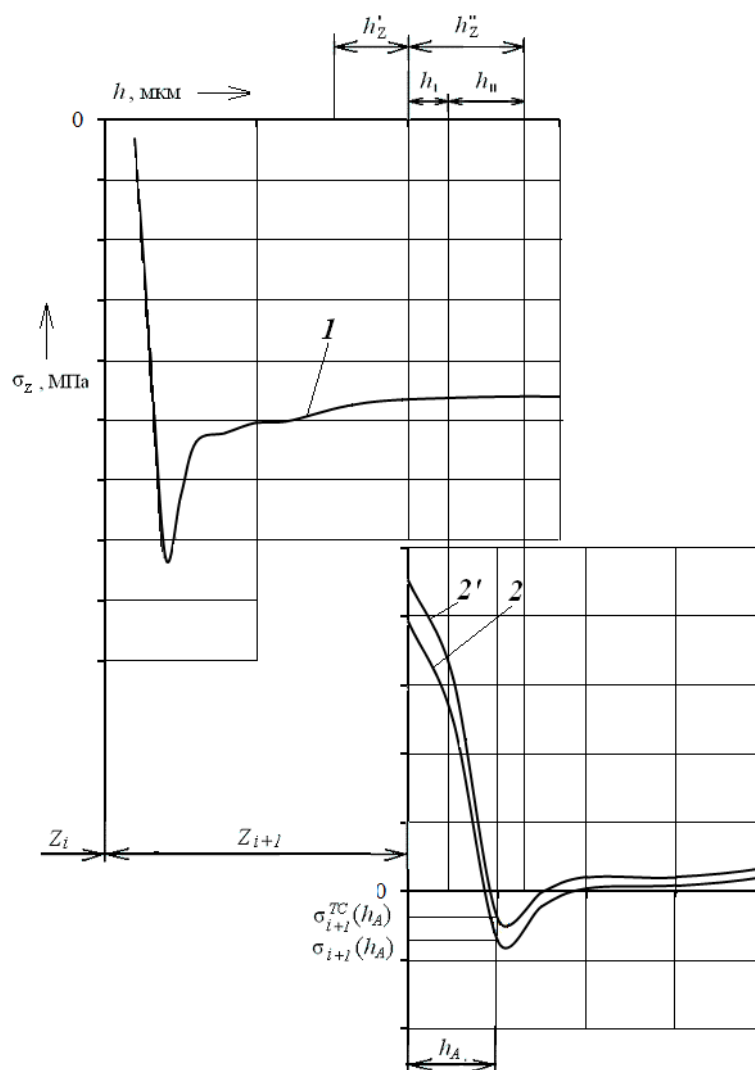


Рис. 2.2. Схема определения ТОН в ПС заготовки с учетом пластического деформирования части припуска: h_Z^I – глубина пластически деформируемого материала припуска Z_{i+1} в ходе $(i+1)$ -ой операции, мм; h_Z^{II} – глубина вновь образуемого поверхностного слоя, упрочненного в процессе $(i+1)$ -ой операции, мм; h_I – глубина поверхностного слоя заготовки после $(i+1)$ -ой операции, на которой происходит наследование остаточных напряжений из зоны h_Z^I , мм; h_{II} – глубина поверхностного слоя заготовки после $(i+1)$ -ой операции, на которой происходит наследование остаточных напряжений из зоны h_Z^{II} , мм; остальное данные см. в подписи к рис. 2.1

Однако, в связи с большим разбросом предельных значений неравенства (2.2), оно не может быть использовано для определения h_Z^I . Поэтому, глубину

пластически деформируемого материала припуска в процессе абразивной обработки заготовок типа тел вращения целесообразно, на наш взгляд, определить из известной зависимости для расчета площади контакта сферического индентора (абразивного зерна) с цилиндрической заготовкой [15]:

$$F = \frac{2 \pi h_Z^I r_{a.z.} (2 R_{заг} + r_{a.z.})}{R_{заг} + r_{a.z.}}, \quad (2.3)$$

где F – площадь контакта индентора с заготовкой, мм²; $R_{заг}$ – радиус обрабатываемой заготовки, мм.

Площадь контакта F может быть также найдена из условия протекания пластической деформации [74]:

$$F = P_{a.z.} / \sigma_T, \quad (2.4)$$

где $P_{a.z.}$ – усилие деформирования единичным абразивным зерном, Н; σ_T – предел текучести материала поверхностного слоя, МПа.

Подставив (2.4) в (2.3), получим:

$$h_Z^I = \frac{P_{a.z.} (R_{заг} + r_{a.z.})}{2 \pi \sigma_T r_{a.z.} (2 R_{заг} + r_{a.z.})}. \quad (2.5)$$

На рис. 2.3 изображена схема контакта шлифовального круга (ШК) с обрабатываемой заготовкой.

Определим площадь периферии шлифовального круга $S_{шк}$:

$$S_{шк} = 2 \pi R_{шк} H_{шк}, \quad (2.6)$$

где $R_{шк}$ – радиус шлифовального круга, мм; $H_{шк}$ – высота шлифовального круга, мм.

Площадь $S_{шк}$ поверхности контакта ШК с заготовкой находится по формуле:

$$S_{шк} = (\alpha / 360^\circ) S_{шк}. \quad (2.7)$$

Из теоремы косинусов следует (см. рис. 2.5):

$$R_{заг}^2 = R_{шк}^2 + (R_{заг} + R_{шк} - Z_{i+1})^2 - 2 R_{шк} (R_{заг} + R_{шк} - Z_{i+1}) \cos \alpha. \quad (2.8)$$

Следовательно, угол контакта круга с заготовкой равен:

$$\alpha = \arccos \left[\frac{R_{шк}^2 + (R_{заг} + R_{шк} - Z_{i+1})^2 - R_{заг}^2}{2 R_{шк} (R_{заг} + R_{шк} - Z_{i+1})} \right]. \quad (2.9)$$

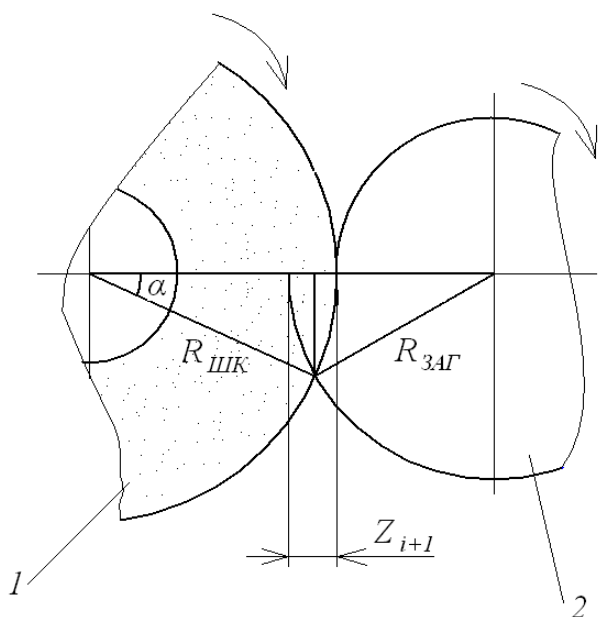


Рис. 2.3. Схема круглого наружного шлифования: 1 – шлифовальный круг; 2 – обрабатываемая заготовка; α – угол контакта круга с заготовкой, град.

Таким образом, общее число абразивных зерен на поверхности ШК можно рассчитать по формуле:

$$n_z = c S_{нк} / (\pi r_{a.z.}^2), \quad (2.10)$$

где c – доля абразивных зерен в объеме ШК (остальное – связка и поры), определяемая по зернистости и номеру структуры круга.

Известно [90], что число режущих зерен n_p в зависимости от давления круга на заготовку находится в пределах от 4 до 17%. Следовательно, примерно 83 – 96% зерен составляют нережущие и давящие зерна. Л. А. Глейзер установил [21], что сумма режущих и пластически деформирующих а.з. для средних условий круглого наружного шлифования составляет около 24% от общего числа зерен. Приняв n_p равным 10%, получили, что 14% зерен являются давящими (деформирующими), то есть:

$$n_d = 0,14 n_z, \quad (2.11)$$

где n_d – число пластически деформирующих абразивных зерен.

Усилие деформирования единичным а.з. поверхностного слоя заготовки можно приблизительно определить по формуле:

$$P_{a.z.} = P_y / n_d, \quad (2.12)$$

где P_y – осевая составляющая силы шлифования, Н.

Величина упрочненного в процессе шлифования слоя равняется h_Z^H (см. рис. 2.2) и может быть приближенно определена по формуле [84]:

$$h_Z^H = \sqrt{P_{A3}/2 \sigma_T}. \quad (2.13)$$

Расчет ТОН с учетом наследования остаточных напряжений в ПС, возникших в ходе выполнения i -ой операции механической обработки, следует проводить следующим образом. Предположим, что необходимо определить значение ТОН на некоторой глубине h_A шлифованной детали (см. рис. 2.2). Первоначально следует выявить, в какой из областей (h_I или h_{II}) находятся искомые ТОН. Предположим, что значения h_I и h_{II} подобны h_Z^I и h_Z^H , т.е. $h_I / h_{II} = h_Z^I / h_Z^H$. Сумма h_I и h_{II} равняется h_Z^H . Следовательно, можно составить систему уравнений и получить из нее значения искомых величин:

$$\begin{cases} h_I / h_{II} = h_Z^I / h_Z^H; \\ h_I + h_{II} = h_Z^H. \end{cases} \quad (2.14)$$

Пользуясь принципом подобия, определим глубину залегания остаточных напряжений для каждого рассматриваемого случая. При этом зависимость (2.1) примет следующий вид:

$$\text{при } h_A < h_I: \quad \sigma_{i+1}(h_A) = K_H \sigma_i (Z_{i+1} - h_Z^I [1 - h_A/h_I]) + \sigma_{i+1}^{TC}(h_A); \quad (2.15)$$

$$\text{при } h_I < h_A < h_Z^H: \quad \sigma_{i+1}(h_A) = K_H \sigma_i (Z_{i+1} + h_I + h_A h_{II} / h_Z^H) + \sigma_{i+1}^{TC}(h_A). \quad (2.16)$$

На глубине $h_A > h_Z^H$ материал ПС не подвергается пластической деформации, а следовательно, для расчетов остаточных напряжений необходимо использовать зависимость (2.1).

Анализ результатов исследований наследования ТОН в ПС заготовок из труднообрабатываемой коррозионно-стойкой стали 95X18 показал, что степень влияния полученных в ходе предварительной обработки точением и ультразвуковым твердосплавным выглаживанием (УЗТВ) остаточных напряжений на различных глубинах ПС заготовки существенно различается (рис. 2.4 – 2.5) [34, 35].

Общеизвестно, что окончательные операции технологического процесса (ТП) изготовления деталей машин (шлифование, высокоскоростное тонкое точение) сопряжены с высокими контактными температурами в зоне механической обра-

ботки, которые не только являются одними из определяющих факторов, влияющих на образование в ПС заготовки новых (чаще всего растягивающих) остаточных напряжений, но и способны релаксировать (снижать абсолютную величину) уже имеющиеся ТОН.

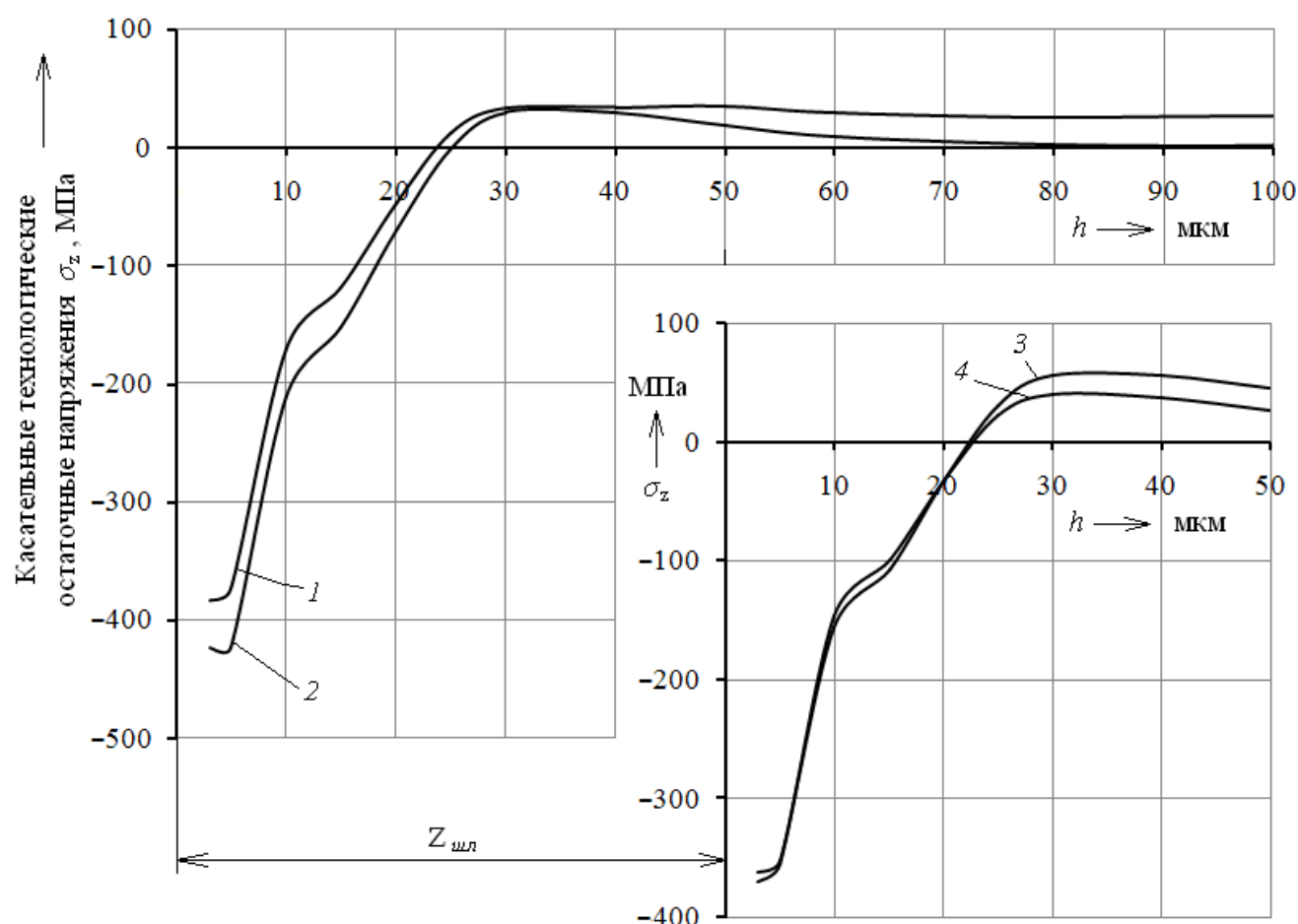


Рис. 2.4. Схема технологического наследования касательных остаточных напряжений в ПС заготовок из коррозионно-стойкой стали 95X18 при выполнении операций точения (1, 2) и последующего шлифования с выхаживанием (3, 4): 1 – глубина резания $t = 0,4$ мм; подача $S = 0,096$ мм/об; окружная скорость заготовки $V_3 = 20$ м/мин; 2 – $t = 0,2$ мм; $S = 0,096$ мм/об; $V_3 = 31,3$ м/мин; 3, 4 – припуск на шлифование $Z_{шл} = 0,05$ мм; скорость подачи стола $V_s = 30$ мм/мин; $V_3 = 40$ м/мин

Вследствие этого, коэффициент наследственности K_H также будет уменьшаться, причем на различных глубинах ПС степень его уменьшения может быть

различна. Так на самой поверхности (в зоне контакта инструмента с заготовкой) будет наблюдаться максимальная температура, обусловленная выбранными элементами режима обработки, физико-механическими свойствами материалов инструмента и заготовки и функциональными свойствами и условиями применения смазочно-охлаждающего технологического средства.

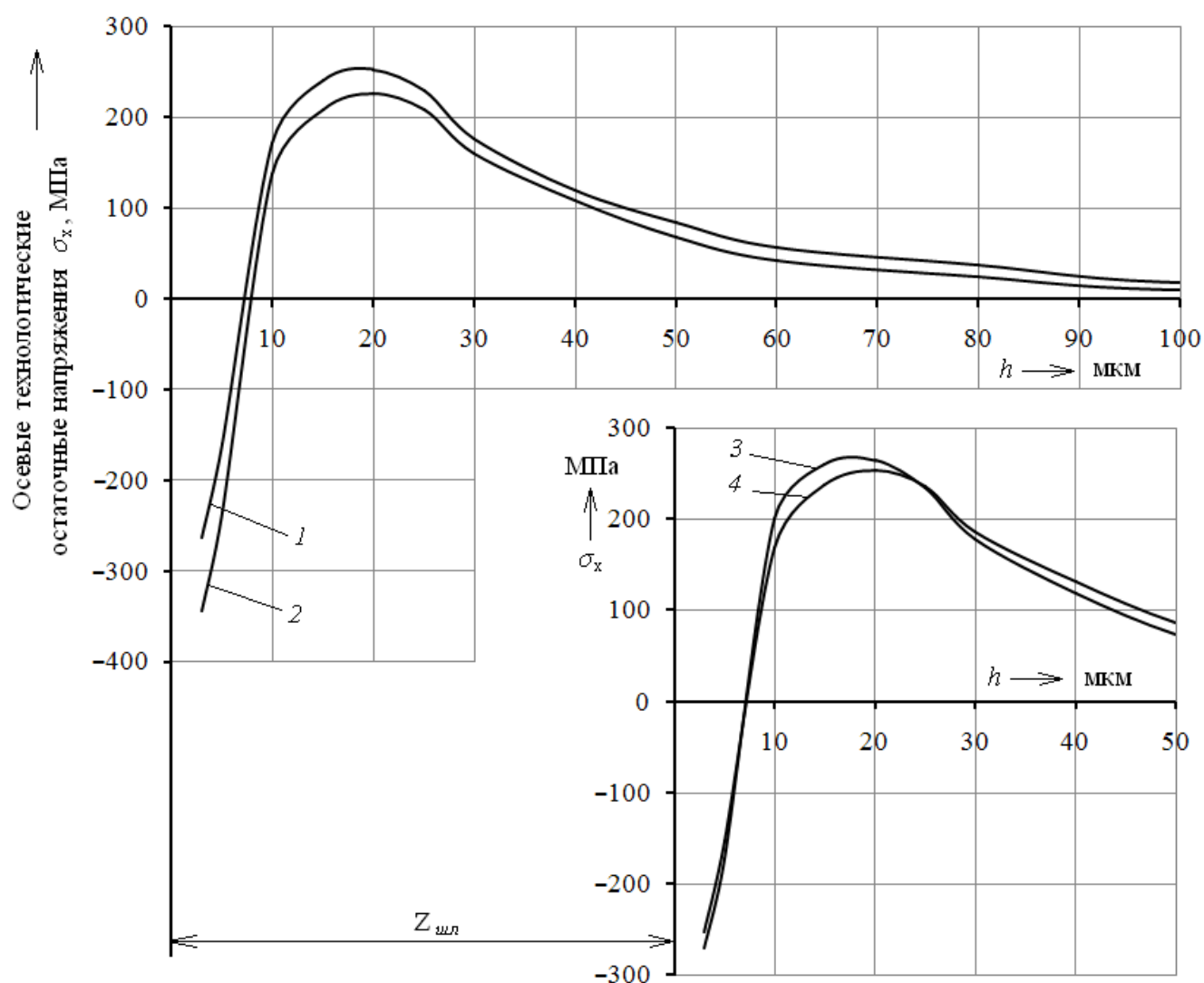


Рис. 2.5. Схема технологического наследования осевых остаточных напряжений в ПС заготовок из коррозионно-стойкой стали 95X18 при выполнении операций точения, УЗТВ и шлифования с выхаживанием: условия выполнения операций см. в подписи к рис. 2.1

Однако, следует учитывать, что при этом время теплового воздействия инструмента (резца, абразивного зерна) на поверхность заготовки будет минималь-

ным, что не позволит существенно снизить уровень имеющихся ТОН. Теоретически в этой области ($h_A = 0$ мкм) коэффициент наследования будет стремиться к максимуму (рис. 2.6).

На глубине $0 < h_A < h_1$ максимальная температура будет постепенно снижаться, однако время ее воздействия несколько возрастет. Следовательно, в этом диапазоне глубин ПС ожидается уменьшение коэффициента K_H вплоть до минимальных значений. В области $h_1 < h_A < h_2$ время теплового воздействия будет продолжать расти, а максимальная температура – снижаться, что не позволит эффективно релаксировать имеющиеся ТОН. Следовательно, коэффициент наследования в этом диапазоне будет стремиться к максимуму. Таким образом, зная характер и время теплового воздействия, можно рассчитать коэффициент K_H на различных глубинах ПС заготовки и дать заключение о степени влияния ТОН, сформированных в ходе предварительной обработки, на значение остаточных напряжений в ПС готовой детали.

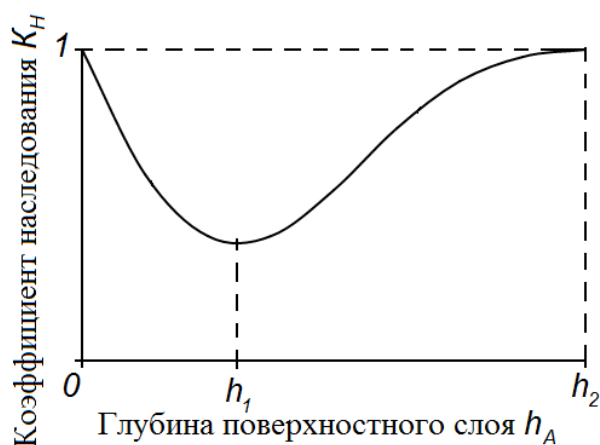


Рис. 2.6. Теоретическая кривая изменения коэффициента технологического наследования K_H по глубине поверхностного слоя обработанной заготовки

Для описания процесса релаксации остаточных напряжений во времени воспользуемся уравнением Одингга-Надаи [63]:

$$\sigma_\tau = \sigma_0 e^{-\tau/\tau_0}, \quad (2.17)$$

где σ_τ – остаточные напряжения после релаксации, МПа; σ_0 – начальные остаточные напряжения, МПа; τ – время релаксации, с; τ_0 – время, в течение которого начальные остаточные напряжения убывают в $e = 2,7$ раз, с.

С. И. Губкин [24] для этих целей же предлагает использовать следующую зависимость:

$$\sigma_{\tau} = \sigma_0 e^{-k \cdot \tau}, \quad (2.18)$$

где k – константа, характеризующая скорость релаксации.

$$k = \frac{E}{\eta}, \quad (2.19)$$

где E – модуль упругости первого рода, МПа; η – коэффициент кинематической вязкости, Па/с.

Характер релаксации остаточных напряжений во времени в различных температурных интервалах специфичен. В зависимости от температуры различают три разновидности этого процесса.

Низкотемпературная релаксация происходит при температурах ниже температуры возврата (ниже 0,25...0,3 от температуры плавления $T_{пл}$). Ровинский Б.М. [71] для этой температурной области дал следующее уравнение релаксации:

$$\sigma_0 - \sigma_{\tau} = S_r \lg(1 + \gamma \tau), \quad (2.20)$$

где γ – величина, не зависящая от S_r и τ ;

$$S_r = \frac{d\sigma}{d \lg \tau}. \quad (2.21)$$

Кроме того, он установил, что релаксация слабо зависит от температуры и совершенно не зависит от напряжений.

Среднетемпературная релаксация преобладает при температурах от (0,25...0,3) $T_{пл}$ до 0,5 $T_{пл}$. В этом диапазоне температур активно развиваются процессы возврата, а ближе к верхнему уровню – рекристаллизация.

Скорость релаксации в этой температурной области находится в экспоненциальной зависимости от температуры релаксации [46]:

$$v = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\tau} = G e^{-\frac{Q}{RT}}, \quad (2.22)$$

где $\Delta\sigma$ – изменение остаточных напряжений за время $\Delta\tau$, МПа; G – модуль сдвига, МПа; Q – энергия активации релаксации, Дж/моль; R – универсальная газовая по-

стоянная, $R = 8,314$ Дж / моль К; T – температура, при которой происходит процесс релаксации, К.

В результате,

$$\sigma_0 - \sigma_\tau = \tau G e^{-\frac{Q}{RT}}. \quad (2.23)$$

Эффективность релаксации определяется по зависимости [32]:

$$E_P = \frac{\sigma_0 - \sigma_\tau}{\sigma_0}. \quad (2.24)$$

При $E_P = 1$ следует говорить о полной релаксации ТОН, а при $E_P = 0$ – о ее отсутствии.

Подставив (2.23) в зависимость (2.24), получим следующее выражение для расчета эффективности релаксации:

$$E_P = \frac{\tau G}{\sigma_0 e^{\frac{Q}{RT}}}. \quad (2.25)$$

При температурах свыше $0,5T_{\text{пл}}$ начинается так называемая высокотемпературная релаксация, для которой также характерны закономерности, полученные для среднетемпературной релаксации.

Энергию активации для реализации процесса релаксации приближенно можно определить следующим образом. Из справочной литературы (например, [85]) выбирают элементы режима высокотемпературного отпуска (температура термообработки T , время термообработки τ), соответствующие полному снятию ТОН в ПС ($E_P = 1$). При этом в качестве начальных напряжений σ_0 выбирают максимально возможные напряжения, соответствующие пределу текучести σ_T материала обрабатываемой заготовки. Далее из выражения (2.25) определяют энергию активации:

$$Q = R T \ln \frac{G \tau}{\sigma_0}. \quad (2.26)$$

Таким образом, для определения эффективности тепловой релаксации исходных ТОН в ПС обработанных заготовок необходимо выяснить характер температурного воздействия на различных глубинах ПС.

Общая эффективность релаксации на заданной глубине ПС, равной h_A , определяется по зависимости:

$$E_p(h_A) = \frac{\sigma_H - \sigma_K}{\sigma_H}, \quad (2.27)$$

где σ_H – остаточные напряжения на глубине ПС, равной h_A , в начальный момент времени, МПа; σ_K – остаточные напряжения на глубине ПС, равной h_A , в момент прекращения релаксации (при температуре $\approx (0,25 \dots 0,3) T_{пл}$).

Коэффициент наследования можно рассчитать по формуле:

$$K_H = 1 - E_p(h_A). \quad (2.28)$$

Расчет ТОН для различных глубин ПС продолжается пока выполняется условие $T_p \geq (0,25 \dots 0,3) T_{пл}$ так как при более низких температурах эффективность релаксации определяется лишь временем. Этот процесс является достаточно длительным и при расчетах им можно пренебречь.

Полученные зависимости для расчета эпюры ТОН и коэффициента наследования были использованы при численном расчете данных параметров на примере обработки заготовок из высокопрочной стали 30ХГСА. Результаты проверки адекватности математических моделей представлены в параграфе 3.6. Наиболее близкое значение расчетного критерия Фишера к табличному (расчетное значение равно 4,38, табличное – 4,46) получили при расчете эпюры остаточных напряжений по предлагаемой во второй главе методике.

Расхождение результатов численного расчета коэффициента наследования K_H и экспериментального определения в лабораторных условиях не превышает 24 %, что находится в пределах точности эксперимента, что свидетельствует об адекватности разработанных математических зависимостей реальным условиям обработки и о возможности использования этих зависимостей для прогнозирования величины ТОН и коэффициента наследования.

2.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ РЕЛАКСАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Анализ априорной информации, представленный в первой главе, показал, что наиболее распространенной формой индентора для обработки поверхностно-пластическим деформированием путем ультразвукового выглаживания, является сфера. Однако, исследованиями [74] установлено, что использование сферических инденторов приводит к образованию перед деформирующим элементом так называемой «волны» вытесняемого материала, характеризующейся образованием дефектов и разупрочнением ПС вследствие перенаклепа. Кроме того, применение таких инденторов сопряжено с малой продолжительностью «озвучивания» единичного объема материала ПС, что объясняется точечным контактом инструмента с заготовкой.

Решить проблему увеличения времени «озвучивания» и минимизировать высоту возникающей «волны» вытесняемого материала можно путем применения для ультразвуковой обработки выглаживания инденторов, имеющих полосовой контакт с обрабатываемой заготовкой.

Рассмотрим два варианта ультразвуковой обработки (сферическим и полосовым инденторами) с точки зрения механики контактного взаимодействия [1]. В первом случае твердый сферический индентор радиусом R_{cf} вдавливается в поверхность цилиндрической заготовки радиусом R_{zag} на глубину d_{cf} , образуя область контакта радиусом

$$a = \sqrt{R_{np} \cdot d_{cf}}, \quad (2.29)$$

где R_{np} – приведенный радиус, мм, определяемый по формуле

$$R_{np}^{-1} = R_{cf}^{-1} + R_{zag}^{-1}. \quad (2.30)$$

Глубина проникновения сферического индентора в материал обрабатываемого объекта (заготовки) зависит от усилия прижима P и рассчитывается по зависимости [14]:

$$d_{сф} = \sqrt[3]{\frac{9 P^2}{16 E_{np}^2 R_{np}}}, \quad (2.31)$$

где E_{np} – приведенный модуль упругости (Юнга), МПа:

$$\frac{1}{E_{np}} = \frac{1 - \mu_{инд}^2}{E_{инд}} + \frac{1 - \mu_{заг}^2}{E_{заг}}, \quad (2.32)$$

где $E_{инд}$ и $E_{заг}$ – соответственно, модули упругости материала индентора и объекта, МПа; $\mu_{инд}$ и $\mu_{заг}$ – коэффициенты Пуассона материала индентора и объекта.

Контакт полосового индентора с цилиндрической поверхностью следует представлять как контакт двух цилиндров, радиус одного из которых (выступающего в качестве индентора) равен бесконечности.

Полуширина контакта полосового индентора с цилиндрической поверхностью заготовки также определяется по зависимости (2.29). При этом $R_{np} = R_{заг}$, а глубина проникновения $d_{пол}$ прямо пропорциональна усилию прижима индентора и обратно пропорциональна длине контакта:

$$d_{пол} = \frac{4 P}{\pi E_{np} L}, \quad (2.33)$$

где L – длина контакта индентора с заготовкой, мм.

Из зависимости (2.33) следует, что увеличение длины контакта индентора с заготовкой приводит к существенному снижению глубины его проникновения в заготовку и поэтому уменьшает вытесняемую «волну» материала ПС. Косвенно об объеме вытесняемого материала свидетельствует глубина проникновения $d_{сф}$ и $d_{пол}$ индентора в ПС заготовки (рис. 2.7). При одинаковой величине усилия прижима $P = 10$ Н, глубина проникновения сферического индентора радиусом $R_{сф} = 5$ мм в ПС заготовки диаметром 50 мм составляет примерно $98 \cdot 10^{-5}$ мм (расчет по зависимости (2.31)), а полосового индентора длиной 5 мм – $4,8 \cdot 10^{-5}$ мм (зависимость (2.33)), что примерно в 20 раз меньше.

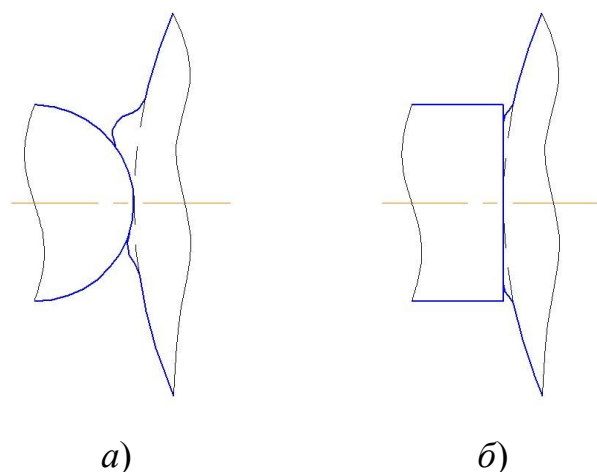


Рис. 2.7. Формы вытесняемой «волны» материала при использовании традиционного индентора сферической формы (а) и полосового индентора (б)

Рассчитанные по зависимостям (2.31) и (2.33) глубины внедрения инденторов обоих типов в ПС цилиндрических заготовок представлены на рис. 2.8.

Материал сферического индентора – сталь ШХ15; полосового индентора – твердый сплав NC9020. В качестве обрабатываемой заготовки использован стальной вал радиусом 25 мм.

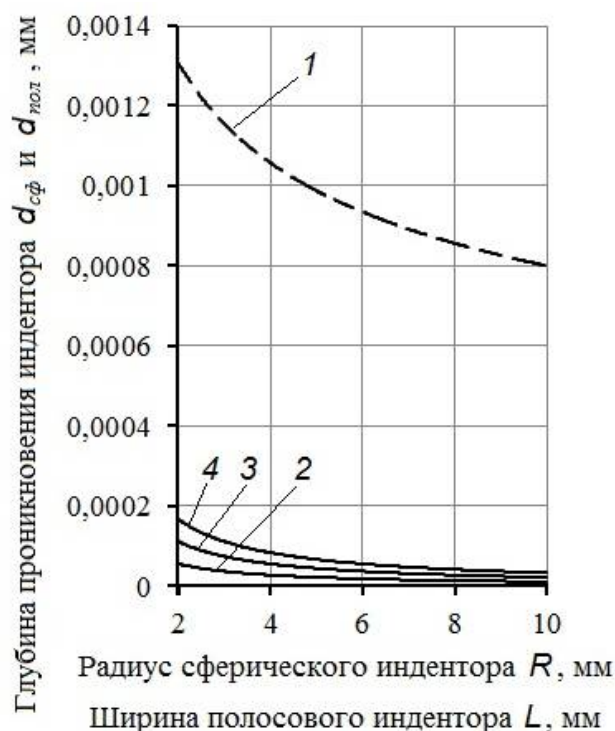


Рис. 2.8. Зависимость глубины внедрения индентора в поверхностный слой заготовки от типа, размера и усилия прижима индентора P : 1 –сферический индентора ($P = 30$ Н); 2, 3, 4 –полосовой индентор; усилие прижима, соответственно: 10, 20 и 30 Н.

Эффективность УЗ-релаксации находится в прямой зависимости от площади контакта индентора с заготовкой, так как с увеличением площади контакта возрастает время «озвучивания» единичного объема материала ПС (малоразмерной области, в которой производится релаксация ТОН).

Площадь касания сферического индентора с цилиндрической поверхностью описывается зависимостью для определения площади шарового сегмента [1]:

$$S_{cf} = 2 \pi R_{cf} d_{cf}. \quad (2.34)$$

Форма площадки контакта полосового индентора с цилиндрической заготовкой представляет собой прямоугольник шириной $2b$ и длиной, равной длине контакта L :

$$S_{пол} = 2 b L. \quad (2.35)$$

Полуширина площадки контакта определяется по зависимости [1]:

$$b = \sqrt{R_{np} d_{пол}}. \quad (2.36)$$

Рассчитанная по зависимостям (2.34) и (2.35) площадь контакта представлена на рис. 2.9.

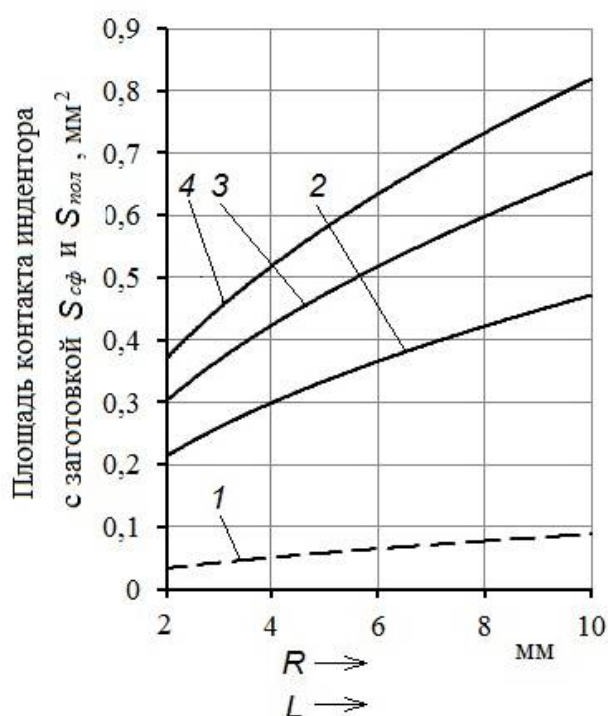


Рис. 2.9. Зависимость площади контакта индентора с заготовкой типа тела вращения от типа, размера и усилия прижима индентора P : условия выполнения операций см. в подписи к рис. 2.8

Из представленных расчетных данных видно, что увеличение радиуса сферического индентора (рис. 2.9, кривая 1) приводит к незначительному увеличению площади контакта, в то время как площадь контакта полосового индентора даже при длине, равной 2 мм, больше примерно в 11 раз (рис. 2.9, кривая 4).

Кроме того, косвенно эффективность релаксации зависит от времени ультразвукового воздействия на зону контакта индентора с заготовкой. Так для полосо-

вого индентора, используемого при УЗ-релаксации вращающейся цилиндрической заготовки, это время можно рассчитать по зависимости:

$$\tau = \frac{60 l}{1000 V_{\text{заг}}}, \quad (2.37)$$

где l – длина пути на площадке контакта, пройденного точечным объемом в ходе обработки, мм; $V_{\text{заг}}$ – окружная скорость заготовки, м/мин.

Учитывая, что полосовой индентор перемещается вдоль продольной оси вращающейся заготовки с некоторой подачей S , длина пути l , пройденного любой точкой на поверхности заготовки определяется как произведение ширины площадки контакта $2b$ на количество проходов индентора i :

$$l = 2 b i \quad (2.38)$$

Количество проходов индентора находим как отношение длины индентора L к подаче S , мм/об:

$$i = L / S \quad (2.39)$$

Зависимость времени релаксации сферическим и полосовым инденторами от размера и усилия прижима представлена на рис. 2.10.

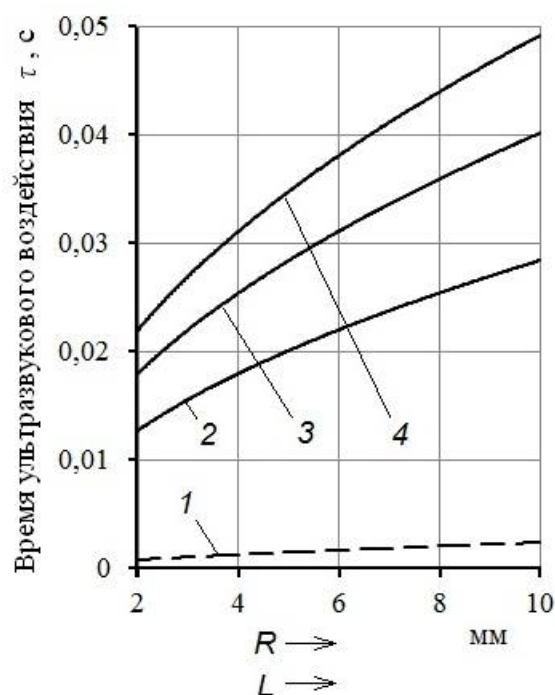


Рис. 2.10. Зависимость времени ультразвукового воздействия на зону контакта индентора с заготовкой от типа, размера и усилия прижима индентора P : условия выполнения операций см. в подписи к рис. 2.8

Полученные расчетные данные демонстрируют существенное увеличение времени ультразвукового воздействия на зону контакта индентора с заготовкой

при использовании полосового индентора. Для определенных условий обработки это увеличение составляет около 20 раз.

2.3. ВЫВОДЫ

По результатам выполненного математического моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Коэффициент технологического наследования K_H различается по глубине ПС обработанной заготовки, что связано с различной степенью температурной релаксации ТОН, сформировавшихся в ходе предварительной технологической операции.

2. На эффективность тепловой релаксации и, как следствие, увеличение или снижение коэффициента наследования K_H в наибольшей степени оказывают влияние физико-механические свойства самого материала обрабатываемой заготовки и элементы режима окончательной обработки, определяющие время и температуру воздействия.

3. Использование полосового индентора по сравнению с использованием сферического позволяет существенно уменьшить объем вытесняемого материала ПС за счет уменьшенного внедрения в материал заготовки, а следовательно, уменьшить вероятность разупрочнения вследствие перенаклепа. Кроме того, аналитический расчет показал, что площадь контакта полосового индентора с цилиндрической заготовкой в несколько (до 11 в пределах расчета) раз превышает площадь контакта со сферическим индентором, что значительно увеличивает время «озвучивания» до 20 раз материала ПС заготовки и эффективность УЗ-релаксации ТОН.

4. Полученные математические модели для расчета эпюры ТОН и коэффициента наследования показали свою адекватность реальным условиям обработки. Расхождение результатов численного расчета коэффициента наследования K_H и экспериментального определения в лабораторных условиях не превышает 11 %, что находится в пределах точности эксперимента, что свидетельствует о возмож-

ности использования этих зависимостей для прогнозирования величины ТОН и коэффициента наследования.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПРИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИИ

3.1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1.1. Показатели технологической эффективности. Контролируемые параметры.

Методы и средства измерения

Экспериментальные исследования выполнены для решения следующих задач:

1. Выявление влияния технологического наследования на величину ТОН и фазовый состав (ФС) материала ПС заготовки (на примере высокопрочных и коррозионностойких сталей и титановых сплавов);
2. Определение коэффициента наследования K_H на различных глубинах ПС обрабатываемой заготовки;
3. Определение эффективности атермического снятия ТОН в процессе ультразвуковой релаксации с использованием полосового твердосплавного индентора.
4. Доказательство адекватности математических моделей технологического наследования ТОН и коэффициента наследования, разработанных во второй главе.

В качестве критериев эффективности использования УЗ поля для обеспечения качества ПС заготовок из труднообрабатываемых материалов использовали следующие показатели:

- 1) остаточные напряжения в обработанных заготовках деталей σ_z , а также ТОН до и после УЗ релаксации, МПа;
- 2) фазовый состав материала ПС заготовок из двухфазной коррозионно-стойкой стали 07X16N6, высоколегированной никелем, для которой характерно образование как α -железа (с объемноцентрированной кубической кристалличе-

ской решеткой), так и γ -железа (с гранецентрированной кубической кристаллической решеткой), а также титановых сплавов ВТ9 и ВТЗ-1, имеющих в своем составе α -титан (с гексагональной плотноупакованной решеткой) и β -титан (с объемноцентрированной кубической решеткой).

Выбор в качестве исследуемых параметров ТОН и ФС поверхностных слоев заготовок обусловлен представленными в первой главе диссертации данными, свидетельствующими о существенном влиянии ТОН и ФС на важнейшие эксплуатационные свойства ответственных деталей машин. Выбранные материалы образцов для исследований представляют наиболее распространенные конструкционные материалы, используемые в настоящее время для изготовления ответственных деталей машин, работающих при больших знакопеременных динамических нагрузках.

В процессе экспериментальных исследований контролировали следующие параметры:

1) ТОН в процессе изготовления деталей из труднообрабатываемых материалов, МПа;

2) соотношение объемов фаз основного металла (железа или титана) в ПС обработанных заготовок из многофазных труднообрабатываемых сталей и сплавов, %;

3) контактные температуры $T_{\text{ш}}$ в зоне цикла круглого наружного шлифования, К.

4) элементы режима обработки: глубина резания при комбинированной обработке точением и выглаживанием t и припуск на шлифование $Z_{\text{шл}}$, мм; продольная подачи стола станка при комбинированной обработке точением и выглаживанием S , мм/об; окружная скорость заготовки при комбинированной обработке точением и выглаживанием V_z , при шлифовании $V_{\text{шл}}^z$ и УЗ релаксации $V^{\text{УЗР}}_z$, м/мин; усилие прижима индентора к обрабатываемой поверхности заготовки при комбинированной обработке точением и выглаживанием P и УЗ релаксации остаточных напряжений $P^{\text{УЗР}}$, Н; время операции УЗ релаксации $\tau^{\text{УЗР}}$, с;

5) косвенные показатели работы станков и инструментов (вибрации, уровень и характер специфического шума, износ сменных многогранных пластин, состояние рабочей поверхности круга и т.д.).

ТОН в ПС обработанных деталей измеряли при помощи измерительно-вычислительного комплекса СИТОН-АРМ, предназначенного для автоматизированного неразрушающего измерения остаточных напряжений в поверхностном слое изделий из металлов и сплавов. Остаточные напряжения определяются путем оценки удельной электропроводности поверхностного слоя посредством регистрации и математической обработки ее амплитудно-фазо-частотной характеристики (АФЧХ) (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Внешний вид прибора «Ситон-АРМ»: 1 – измерительный комплекс; 2 – датчик; 3 – компьютер

СИТОН-АРМ обеспечивает возможность построения эпюры остаточных напряжений с точностью до 25 МПа (по паспорту прибора) по результатам сканирования удельной электропроводности поверхностного слоя детали на 16 глубинах от 3 до 300 мкм – для сталей ферритного класса; от 5 до 400 мкм – для сталей аустенитного класса; от 10 до 500 мкм – для титановых сплавов.

Фазовый состав материала ПС обработанных образцов определяли с помощью рентгеновского измерительного комплекса «Рикор-7» с применением медного катода (рис. 3.2).

Соотношение γ -железа и α -железа в объеме ПС определяется при настройке трубки катода на угол дифракции $2\cdot\Theta \approx 44^\circ$. При этом достигается максимальная

интенсивность пиков аустенита (γ -железо, плоскость $\{111\}$, $2\cdot\Theta \approx 43,5^\circ$) и феррита (α -железо, плоскость $\{110\}$, $2\cdot\Theta \approx 44,5^\circ$), что позволяет использовать значения интенсивностей их пиков для определения соотношения объемов этих фаз.



Рис. 3.2. Внешний вид рентгеновского измерительного комплекса «Рикор-7»:
1 – гониометрический узел; 2 – рентгеновская трубка; 3 – персональный компьютер; 4 – детектор; 5 – вычислительный блок; 6 – заготовка

Соотношение объемов фаз α - и β -титана определяли по измерениям интенсивности пиков на плоскостях: для α -титана – $\{002\}$, $\{101\}$, $\{102\}$ (стандартные углы дифракции $2\cdot\Theta$ соответственно, $38,5^\circ$, $40,2^\circ$, 53°); для β -титана – $\{110\}$ и $\{200\}$ (стандартные углы дифракции $2\cdot\Theta$ соответственно, $38,8^\circ$ и 56°) согласно [75].

Данные с детектора передавались на персональный компьютер и обрабатывались программой MD-10, поставляемой вместе с измерительным комплексом «Рикор-7», после чего выдавалась полученная экспозиция со значениями стандартного угла дифракции $2\cdot\Theta$ по горизонтальной оси и интенсивности пиков I по верти-

кальной. Пример показаний измерения фазового состава двухфазной коррозионно-стойкой стали 07X16H6 на дифрактометре «Рикор-7» показан на рис. 3.3.

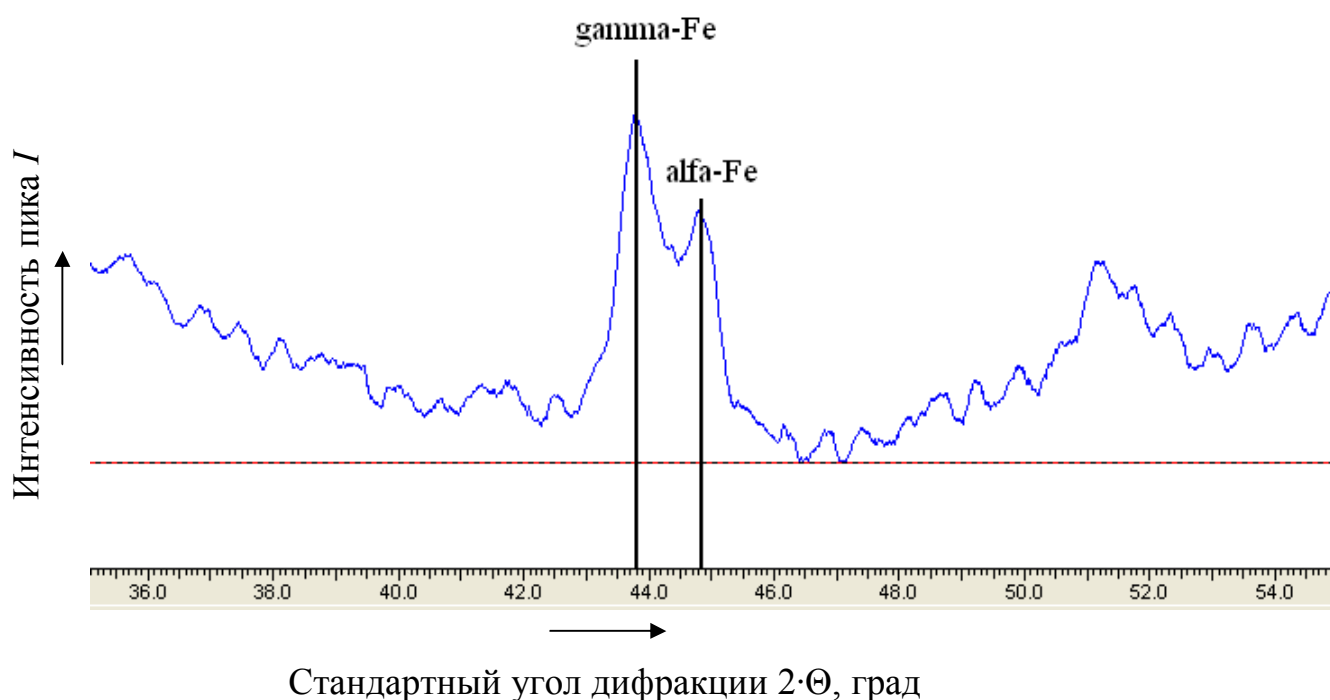


Рис. 3.3. Пример показаний рентгеновского измерительного комплекса «Рикор-7»

Экспериментальные исследования контактных температур $T_{\text{ш}}$ проводили при круглом наружном шлифовании заготовок (колец) из высокопрочной стали 30ХГСА, закрепленных на оправке. Оправка представляла собой устройство для измерения контактной температуры методом полуйскусственной термопары, изготовленное для исследовательских целей на кафедре «Технология машиностроения» Ульяновского государственного технического университета.

Устройство для измерения контактной температуры или тепловой напряжённости процесса (см. рис. 3.4) состоит из вала 10, на котором закреплены диэлектрические втулки 8 и 4, на которых установлены обрабатываемые кольца 6 и 7 из высокопрочной стали 30ХГСА и медные кольца 1, между которыми расположены проставочные диэлектрические кольца 2. Между кольцами 6 и 7 проложена ни-

хромовая проволока, которая при обработке колец 6 и 7 образует спай и передаёт сигнал на кольца 1, с которых токосъёмники 3 снимают показания термоЭДС.

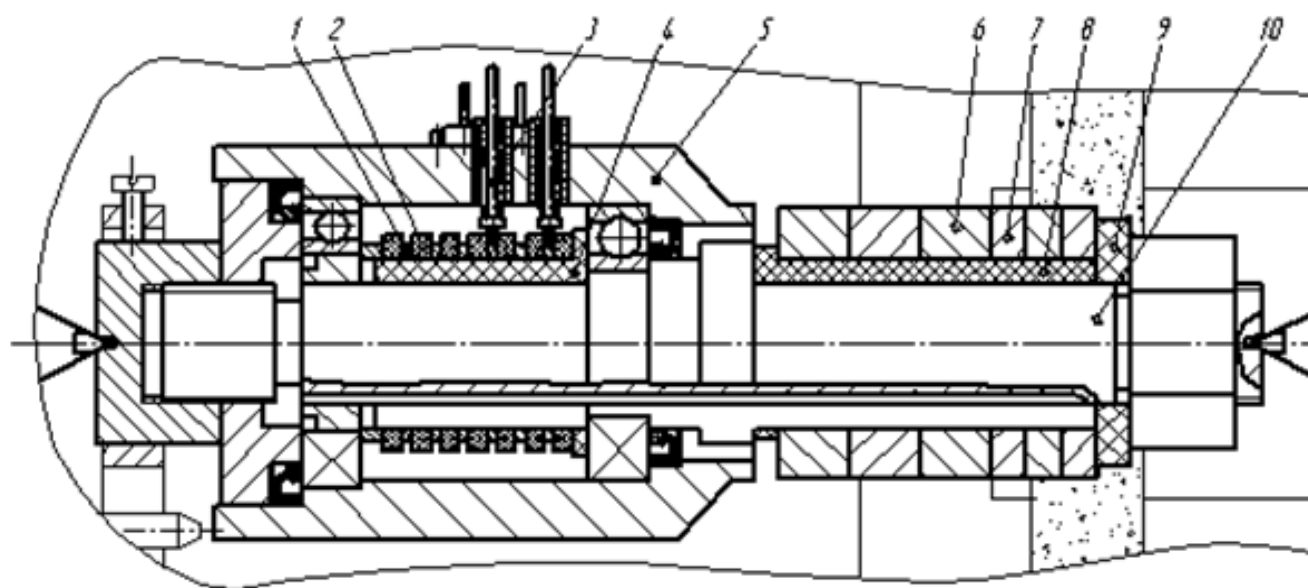


Рис. 3.4. Конструкция устройства для измерения контактных температур в зоне обработки: 1 – медные кольца; 2 – диэлектрические кольца; 3 – токосъёмники; 4 – диэлектрическая втулка; 5 – корпус; 6 – обрабатываемые кольца; 7 – обрабатываемые кольца; 8 – диэлектрическая втулка; 9 – диэлектрические кольца; 10 – вал.

Далее сигнал поступает на аналогово-цифровой преобразователь АЦП/ЦАП с усилителем, передающий обработанный сигнал на персональный компьютер. Затем при помощи специального программного обеспечения ZetLab информация обрабатывается и выводится на экран монитора в графическом и численном видах.

3.1.2. Материалы и образцы для экспериментальных исследований

В пункте 1.1.1 настоящей диссертации приведена классификация труднообрабатываемых сталей и сплавов по коэффициентам обрабатываемости и теплопроводности [25]. Согласно этим данным, в качестве материалов для исследуемых

заготовок были выбраны высокопрочная сталь 30ХГСА, коррозионно-стойкая сталь мартенситного класса 40Х13, коррозионно-стойкая сталь аустенитно-мартенситного класса 07Х16Н6 и титановые жаропрочные сплавы ($\alpha+\beta$)-класса ВТ9 и ВТ3-1. Все материалы относятся к разным группам обрабатываемости и имеют значительные различия в механических и физических свойствах. Физико-механические свойства и химический состав выбранных материалов приведены в табл. 3.1 и 3.2.

Эскиз образцов для экспериментального исследования представлен на рис. 3.5, их габаритные размеры приведены в табл. 3.3.

3.1. Физико-механические свойства материала исследуемых образцов при 20 °С (согласно ГОСТ 4545, 5949, 18907 и 26492)

Группа обрабатываемости	Марка материала	Предел прочности σ_B , МПа	Предел текучести $\sigma_{0.2}$, МПа	Модуль упругости E , ГПа	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м·К	Коэффициент линейного расширения α , 1/К
I	30ХГСА	1080	830	215	38	11,7
II	40Х13	1140	910	218	25	10,8
III	07Х16Н6	1080	880	217	17	11,3
VI	ВТ9	1150	1000	118	8	8,4
VI	ВТ3-1	1200	1050	115	8	8,6

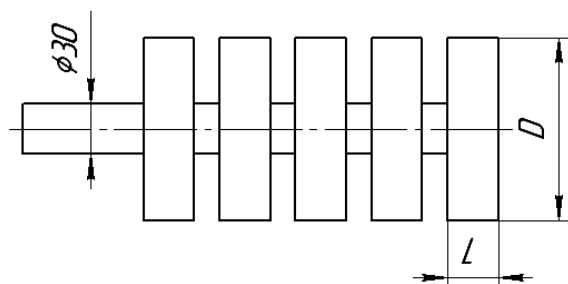


Рис. 3.5. Эскиз образца для экспериментальных исследований технологических остаточных напряжений и фазового состава ПС

3.2. Химический состав материала исследуемых образцов
(согласно ГОСТ 4543, 5632 и 19807)

Группа обрабаты- ваемости	Марка материала	Содержание химического элемента, %									
		C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu	S	P	Fe	
Стали		0,28 – 0,34	0,9 – 1,2	0,8 – 1,1	до 0,3	0,8 – 1,1	до 0,3	до 0,025	до 0,025	основа	
I	30ХГСА										
II	40X13	0,35 – 0,44	до 0,6	до 0,6	до 0,6	12 – 14	—	до 0,025	до 0,03	основа	
III	07X16H6	0,05 – 0,09	до 0,8	до 0,8	5 – 8	15,5 – 17,5	—	до 0,02	до 0,035	основа	
Титановые сплавы		Содержание химического элемента, %									
		Fe	C	Si	Mo	N	Al	Zr	O	H	Ti
VI	BT9	до 0,25	до 0,1	0,2 – 0,35	2,8 – 3,8	до 0,05	5,8 – 7	1 – 2	до 0,15	до 0,015	основа
VI	BT3-1*	0,2 – 0,7	до 0,1	0,15 – 0,4	2 – 3	до 0,05	5,5 – 7	до 0,5	до 0,15	до 0,015	основа

* - не указанное количество хрома в сплаве марки BT3-1 составляет 0,8...2%.

3.3. Основные размеры образцов для экспериментальных исследований

Материал образца	Диаметр шейки D , мм	Ширина шейки L , мм
30ХГСА	70	15
40Х13	58	15
07Х16Н6	60	15
ВТ9	58	20
ВТ3-1	60	30

Режимы термообработки заготовок из выбранных материалов, направленной на полное снятие ТОН в ПС, и рассчитанные с использованием зависимости (2.26) приближенные значения энергии активации приведены в табл. 3.4. Для расчетов принимали модуль сдвига G равным при 20⁰С для сталей – 79,3 ГПа, для титановых сплавов – 41,4 ГПа [1].

3.4. Режимы термообработки исследуемых образцов и рассчитанная энергия активации

Группа обрабатываемости	Марка материала	Режим термообработки		Энергия активации релаксации Q , Дж/моль
		Температура T , °С	Время выдержки τ , ч	
I	30ХГСА	550	1	87200
II	40Х13	600	3	99800
III	07Х16Н6	400	1	71000
VI	ВТ9	600	2	91500
VI	ВТ3-1	600	2	92100

3.1.3. Экспериментальная установка для исследования эффективности обработки заготовок типа тел вращения с наложением ультразвуковых колебаний

Исследования технологической эффективности комбинированной обработки точением и ультразвуковым твердосплавным выглаживанием (УЗТВ) для

формирования заданных параметров качества ПС заготовок выполняли на экспериментальной установке, созданной на базе токарного станка мод. УТ16П.

Устройство для комбинированного точения и УЗТВ, устанавливаемое на станок УТ16П и оснащенное оборудованием для контроля составляющих сил обработки, изображено на рис. 3.8.

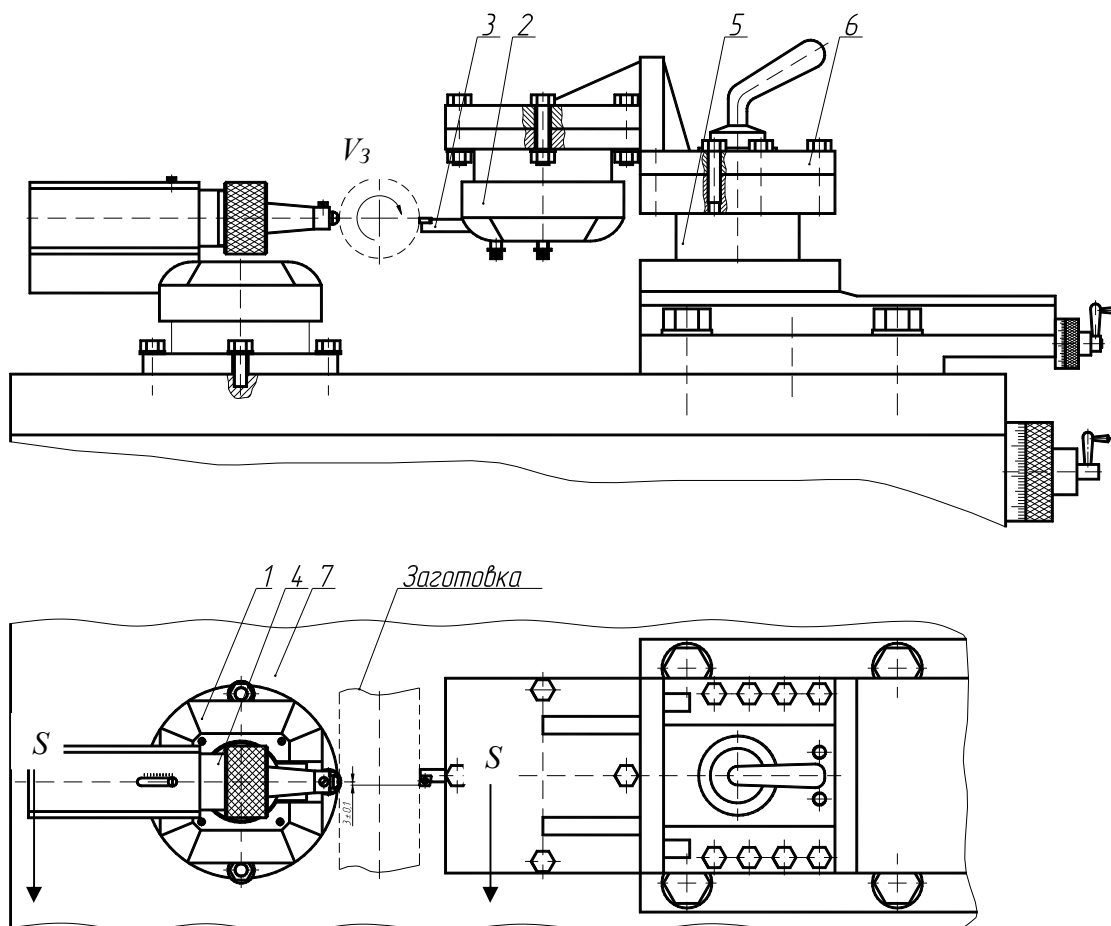


Рис. 3.8. Устройство для комбинированной обработки точением и ультразвуковым твердосплавным выглаживанием: 1, 2 – динамометр УДМ-100; 3 – резец, оснащенный сменной многогранной пластиной из твёрдого сплава; 4 – устройство для УЗТВ заготовок; 5 – резцедержатель; 6 – кронштейн; 7 – суппорт станка

В качестве деформирующего инструмента (индентора) на этапе УЗТВ использовали сменные многогранные пластины Korloy CNMG 120408-HS из

твердого сплава марки NC3010, предназначенного для обработки заготовок из легированных углеродистых сталей, NC9025 – для коррозионно-стойких сталей и NC8010 – для титановых сплавов.

Корпус устройства 4 закреплялся в динамометре 1. Все устройство вместе с динамометром закрепляется на суппорте станка 7 на высоту, необходимую для того, чтобы деформирующий инструмент находился строго по оси центров. Резец 3 закреплен в динамометре 2, который в свою очередь закреплен на кронштейне 6, жестко соединенным с резцедержателем станка 5.

Для исследования процесса обработки заготовок твердосплавным выглаживанием было использовано устройство для ППД заготовок с наложением УЗК, спроектированное и изготовленное на кафедре «Технология машиностроения» УлГТУ (рис. 3.9).

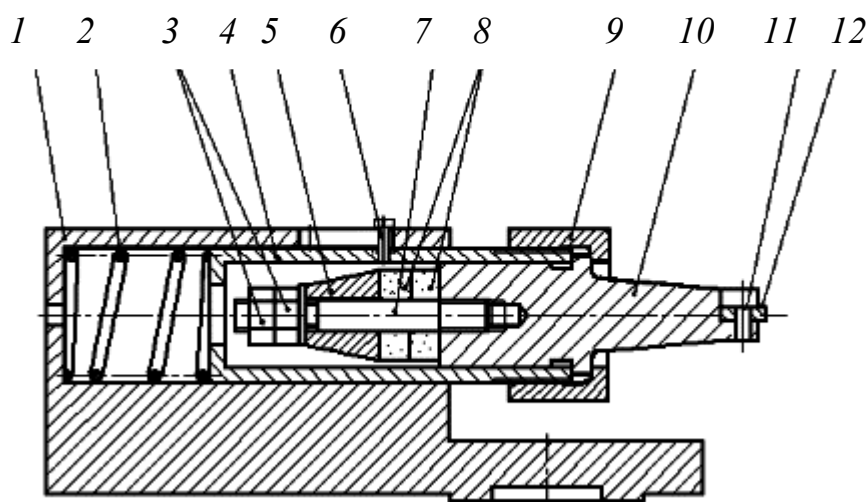


Рис. 3.9. Устройство для твердосплавного выглаживания заготовок с наложением УЗК: 1 – корпус; 2 – пружина; 3, 9 – гайка; 4 – стакан; 5 – отражающая шайба; 6 – винт; 7 – шпилька; 8 – пьезокерамические кольца; 10 – волновод; 11 – штифт; 12 – деформирующий элемент (индентор)

Устройство для выглаживания состоит из корпуса 1, в котором размещается стакан 4, имеющий возможность возвратно-поступательного движения, в котором при помощи гайки 9 закреплен пьезокерамический преобразователь. Последний

состоит из волновода 10 и прикрепленных к нему с помощью шпильки 7 и двух гаек 3 двух пьезокерамических колец 8, изготовленных из керамического материала ЦТС-19 и отражающей шайбы 5. Деформирующая пластина 12 жестко закреплена в волноводе 10 штифтом 11. Необходимая для деформирования сила (до 400 Н) создается пружиной 2. Ход пьезокерамического преобразователя ограничивает винт 6.

Сообщение УЗК пьезокерамическому преобразователю осуществлялось от ультразвукового генератора УЗГ-641А с частотой УЗК $f = 22$ кГц, обеспечивающего для используемой конструкции выглаживателя амплитуду колебаний, равную 8...10 мкм.

Наладка установки производилась следующим образом: сначала подводится при помощи продольного суппорта выглаживатель 4 и создается необходимое усилие. Затем подводится поворотный суппорт с резцом 3 и выставляется зазор между заготовкой и резцом.

Выбор элементов режима комбинированной обработки точением и УЗТВ осуществлялся исходя из технологических рекомендаций фирмы-производителя [113] сменных твердосплавных пластин. Рекомендуемые режимы были снижены на 30-40% в связи с уменьшением жесткости технологической системы (т.к. резец 3 установлен в динамометр 2, который в свою очередь крепится к резцедержателю 5 станка с помощью кронштейна 6; см. рис. 3.8).

Окончательную обработку круглым наружным шлифованием с врезной подачей осуществляли на круглошлифовальном станке 3М151В кругом 1 600х25х304,8 24А F8 М 7V 50 м/с 2 кл. ГОСТ Р 52781-2007. Круги данной характеристики широко применяются для шлифования заготовок из различных металлов и сплавов, в том числе и труднообрабатываемых, в условиях действующего производства. Шлифовальный круг перед каждым использованием проверяли с целью определения соответствия основных геометрических параметров, обнаружения возможных дефектов (сколы, трещины и т.п.), оценки состояния рабочей поверхности круга после правки. Круг статически уравнивали в сборе с планшайбой.

3.5. Рекомендации по выбору элементов режима комбинированной обработки точением и твердосплавным выглаживания с наложением УЗК

Материал обрабатываемой заготовки	Сменная многогранная пластина	Элементы режима обработки		
		Глубина резания t , мм	Окружная скорость заготовки V_3 , м/мин	Продольная подача S , мм/об
30ХГСА	Korloy CCMT 060204-C25 NC3120	2,0	70	0,15
40Х13	Korloy CCMT 060204-HMP NC9020	1,5	80	0,15
07Х16Н6	Korloy CCMT 060204-HMP NC9020	1,5	70	0,15
ВТ9, ВТ3-1	Korloy CCMT 060204-HPF NC8010	1,0	50	0,08

Значения элементов режима круглого наружного шлифования (табл. 3.6) выбираем по технологическим рекомендациям [26] и сохраняли постоянными на всех этапах экспериментальных исследований.

В качестве СОТС при точении и шлифовании использовали 3 %-ную полусинтетическую смазочно-охлаждающую жидкость (СОЖ) «Велс-1», которую подавали в зону контакта инструмента с заготовкой свободно-падающей струей с расходом 10 дм³/мин на операции комбинированной обработки точением и УЗТВ и 40 дм³/мин на операции круглого наружного шлифования с врезной подачей. Для уменьшения силы трения и увеличения периода стойкости индентора при УЗТВ и УЗ-релаксации использовали концентрат той же СОЖ, нанося его на поверхность обрабатываемой заготовки кистью с расходом 5 г/мин. Выбранная СОЖ нашла широкое применение в действующих производствах при лезвийной и абразивной обработке заготовок из труднообрабатываемых материалов.

3.6. Рекомендации по выбору элементов режима круглого наружного шлифования [25]

Материал обрабатываемой заготовки	Элементы режима обработки		
	Окружная скорость круга V_K , м/с	Окружная скорость заготовки V_3 , м/мин	Скорость продольной подачи стола V_S , мм/мин
30ХГСА	30 – 35	20 – 30	100
40Х13	30 – 35	15 – 20	100
07Х16Н6	25 – 30	10 – 20	100
ВТ9, ВТ3-1	20 – 30	10 – 20	100

Перед проведением экспериментов проверяли работоспособность всего используемого оборудования: станков, установки для УЗТВ, УЗ-генератора, измерительных приборов и т.д.

3.1.4. Расчет числа параллельных опытов

Расчет числа параллельных опытов в серии производили, используя “Методику выбора и оптимизации контрольных параметров технологических процессов (РДМУ 109-77)” [114], принимая нормальный закон распределения случайной величины:

$$n_0 = \frac{t_\beta^2 \cdot \sigma_{xi}^2}{\varepsilon^2}, \quad (3.1)$$

где t_β – квантиль нормального распределения измеряемого параметра при доверительной вероятности β . Значение $\beta = 0,95$ [114] выбирали с учетом точности применяемых измерительных и технологической систем, при этом значение $t_\beta = 1,96$ [114]; σ_{xi} – дисперсия распределения измеряемого параметра:

$$\sigma_{xi}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}, \quad (3.2)$$

где x_i – текущее значение параметра при i -ом опыте; $\bar{x}$ – среднее арифметическое значение параметра:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (3.3)$$

где n – число предварительных опытов; ε – заданная ошибка выборочной средней измеряемого параметра, при этом:

$$\varepsilon = \alpha_0 \cdot \bar{X}, \quad (3.4)$$

где α_0 – относительная ошибка среднего значения параметра. В соответствии с рекомендациями указанной выше методики [114] приняли $\alpha_0 = 0,15$.

Величины σ_{xi}^2 и $\bar{x}$ определяли по результатам предварительных экспериментов.

Расчет необходимого числа параллельных опытов при комбинированном точении и УЗТВ образцов выполняли по результатам предварительных экспериментов для среднего арифметического значения величины технологических остаточных напряжений σ_z (табл. 3.7), как параметра, имеющего наибольший разброс значений при замерах.

Условия проведения предварительных экспериментов: обрабатывали образцы из титанового сплава ВТ9 резцом, оснащенным сменной многогранной пластиной Korloy CCMT 060204-HPF NC8010, и индентором Korloy CNMG 120408-HS NC8010 с глубиной резания $t = 0,75$ мм, окружной скоростью заготовки $V_z = 45,5$ м/мин, продольной подачей $S = 0,064$ мм/об и усилием прижима индентора $P = 200$ Н.

Обработку результатов исследований выполняли на ЭВМ с использованием программного обеспечения “Microsoft Excel 2010”.

3.7. Расчет необходимого числа параллельных опытов

№ опыта	σ_z , МПа	Расчет необходимого числа параллельных опытов
1	180	$\bar{x} = 177,3 \text{ МПа};$ $\sigma_{xi}^2 = 9,8 \text{ МПа};$ $t_{\beta} = 1,96; \alpha = 0,15;$ $\varepsilon = 26,6 \text{ МПа};$ $n_0 = 1,96^2 \cdot 9,8 / 26,6^2 = 0,1.$ Принимаем число параллельных опытов серии $n_0=3$
2	172	
3	177	
4	181	
5	174	
6	176	
7	175	
8	180	
9	181	
10	177	

3.2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКЕ ТОЧЕНИЕМ И УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ТВЕРДОСПЛАВНЫМ ВЫГЛАЖИВАНИЕМ

На первом этапе выполняли предварительные экспериментальные исследования, в процессе которых осуществлялась обработка заготовок из труднообрабатываемых материалов с целью выбора элементов, обеспечивающих наибольшие, средние и наименьшие по величине остаточные напряжения. Значения элементов режима обработки выбирали путём сравнения значений ТОН, сформировавшихся на глубине припуска ($Z_{шл} = 0,1$ мм) под последующего шлифования.

На рис. 3.10 – 3.29 представлены полученные на измерительно-вычислительном комплексе СИТОН-АРМ эпюры ТОН после комбинированной обработки точением и УЗТВ заготовок типа жестких валов, изготовленных из материалов, указанных в табл. 3.1.

Представленные на рис. 3.10 и 3.11 эпюры, получены в результате измерения ТОН в ПС образцов после выполнения комбинированной обработки заготовок из высокопрочной стали 30ХГСА точением и УЗТВ с различными глубиной резания t и окружной скоростью заготовки V_3 . Выявлено неоднозначное влияние изменения этих элементов режима обработки на напряженно-деформированное состояние ПС. Так, с увеличением глубины резания с 0,5 до 1 мм снижается абсолютная величина сжимающих остаточных напряжений, что связано с ростом контактных температур в зоне обработки и, как следствие, с развитием процессов отпуска. Несколько иначе выглядит изменение величины ТОН с увеличением окружной скорости заготовки.

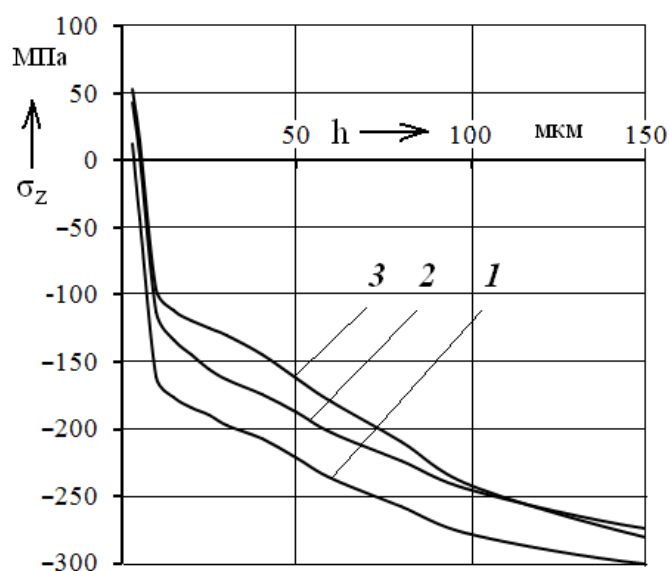


Рис. 3.10. Эпюры остаточных напряжений после комбинированной обработки заготовок из стали 30ХГСА точением с различной глубиной резания и УЗТВ: 1, 2, 3 – соответственно $t = 0,5$; $0,75$; $1,0$ мм; остальные элементы режима обработки: окружная скорость вращения заготовки $V_3 = 44$ м/мин; подача стола $S = 0,054$ мм/об; усилие прижима индентора $P = 200$ Н

При возрастании V_3 до 44 м/мин наблюдается рост сжимающих напряжений. По-видимому, это объясняется увеличением силовой составляющей обработки и упрочнением ПС. Однако, при дальнейшем возрастании окружной скорости V_3 тепловой фактор становится преобладающим и наблюдается снятие остаточных напряжений (рис 3.11, кривая 3).

На рис. 3.12 и 3.13 показано влияние изменения подачи S и усилия прижима индентора P на характер распределения и величину ТОН в ПС заготовок из стали 30ХГСА при комбинированном точении и УЗТВ.

Рис. 3.11. Эпюры остаточных напряжений после комбинированной обработки заготовок из стали 30ХГСА точением и УЗТВ с различной окружной скоростью заготовки: 1, 2, 3 – соответственно $V_3 = 35,2; 44; 54,9$ м/мин; остальные элементы режима обработки: $t = 0,75$ мм; $S = 0,054$ мм/об; $P = 200$ Н

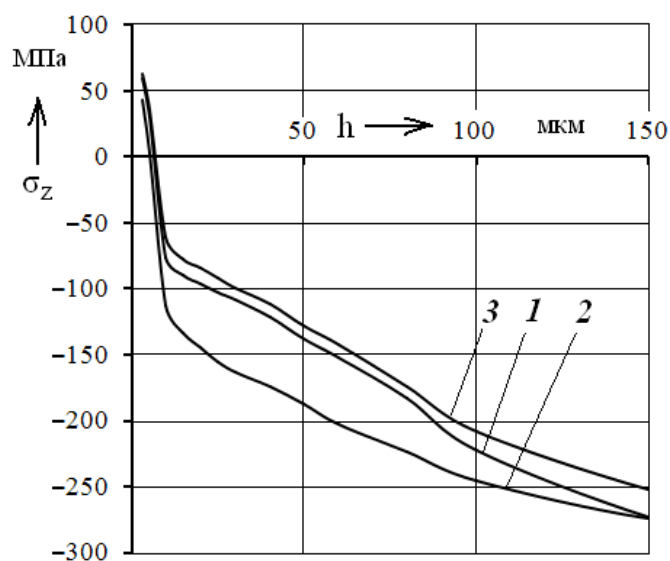
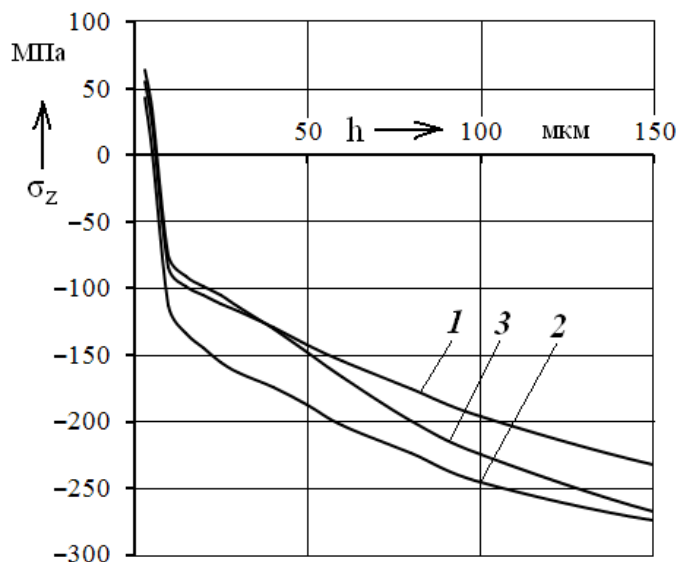


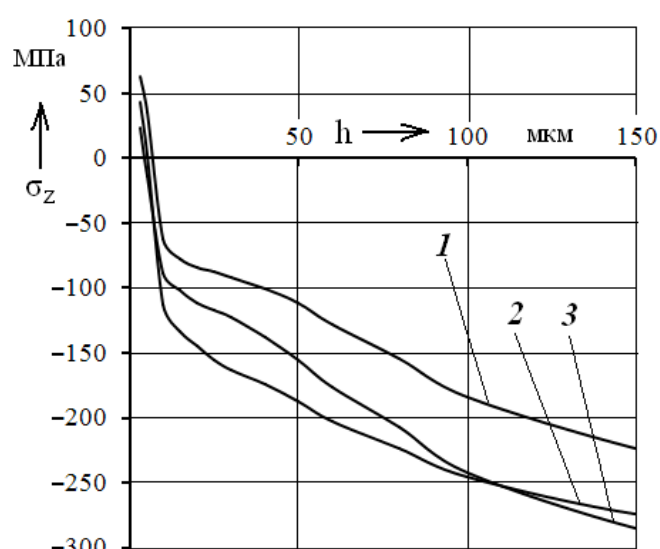
Рис. 3.12. Эпюры остаточных напряжений после комбинированной обработки заготовок из стали 30ХГСА точением с различной подачей и УЗТВ: 1, 2, 3 – соответственно $S = 0,046; 0,054; 0,064$ мм/об; остальные элементы режима обработки: $t = 0,75$ мм; $V_3 = 44$ м/мин; $P = 200$ Н

Как и в случае с окружной скоростью вращения заготовки (рис. 3.11), первоначальный рост подачи (до 0,054 мм/об) приводит к увеличению абсолютной величины сжимающих ТОН, вследствие возрастания силового воздействия на материал ПС заготовки со стороны инструмента.

Дальнейшее увеличение подачи способствует возрастанию радиальной составляющей силы резания и, соответственно, началу перенаклепа и разупрочнения материала.

Увеличение величины силы прижима индентора P приводит к возрастанию количества дислокаций в ПС, а так как контактные температуры в зоне выглаживания очень малы и не превышают 300°C [32], то тепловой фактор оказывает минимальное влияние на снижение абсолютного значения ТОН. Таким образом, величина сжимающих остаточных напряжений возрастает.

Рис. 3.13. Эпюры остаточных напряжений после комбинированной обработки заготовок из стали 30ХГСА точением и УЗТВ с различным усилием прижима индентора: 1, 2, 3 – соответственно $P = 100; 200; 300$ Н; остальные элементы режима обработки: $t = 0,75$ мм; $V_3 = 44$ м/мин; $S = 0,054$ мм/об



Результаты исследования влияния элементов режима комбинированной обработки заготовок из коррозионно-стойкой стали 40Х13 точением и УЗТВ с различной глубиной резания t на ТОН представлено на рис. 3.14. Как следует из результатов, с увеличением глубины резания наблюдается некоторое снижение уровня ТОН на глубине ПС порядка 50 мкм и глубже. Таким образом, на поверхности образцов происходит снятие сжимающих остаточных напряжений. На наш взгляд это связано с увеличением тепловыделения в зоне контакта инструмента с заготовкой.

Результаты исследования влияния окружной скорости заготовки V_3 при обработке заготовок из стали 40Х13 на процесс формирования ТОН представлены на

рис. 3.15. Как видно из графиков, увеличение окружной скорости заготовки приводит к увеличению величины сжимающих напряжений. Это может быть связано, в данном случае, с доминирующим влиянием силового фактора в процессе формирования ТОН в ПС заготовок в сравнении с тепловым.

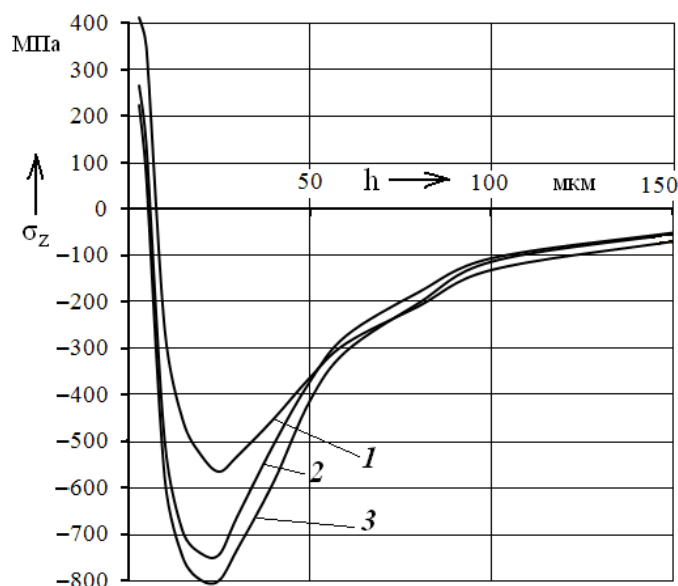
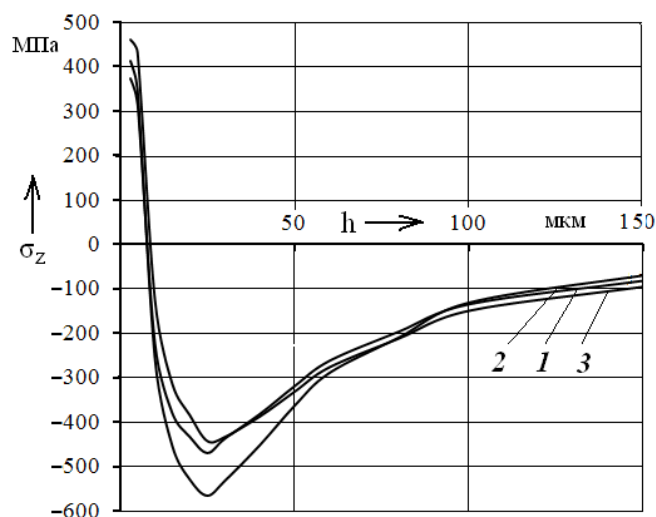


Рис. 3.15. Эпюры остаточных напряжений после комбинированной обработки заготовок из стали 40X13 точением и УЗТВ с различной окружной скоростью заготовки: 1, 2, 3 – соответственно $V_3 = 54,4; 69,1; 86,4$ м/мин; остальные элементы режима обработки: $t = 0,75$ мм; $S = 0,054$ мм/об; $P = 200$ Н

Рис. 3.14. Эпюры остаточных напряжений после комбинированной обработки заготовок из стали 40X13 точением с различной глубиной резания и УЗТВ: 1, 2, 3 – соответственно $t = 0,5; 0,75; 1,0$ мм; остальные элементы режима обработки: $V_3 = 69,1$ м/мин; $S = 0,054$ мм/об; $P = 200$ Н



На рис. 3.16 и 3.17 приведены результаты экспериментальных исследований влияния величины подачи S и усилия прижима твердосплавного полосового индентора P на остаточные напряжения в ПС заготовок. Как видно из представленных графиков, увеличение S приводит к формированию значительных сжимаю-

ших остаточных напряжений, что, на наш взгляд, объясняется возрастанием радиальной составляющей силы обработки на этапе точения и, как следствие, увеличению количества дислокаций и упрочнения материала ПС.

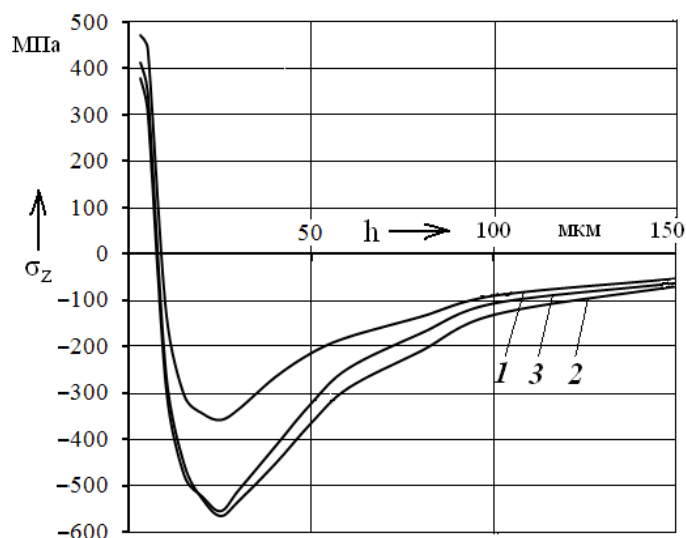
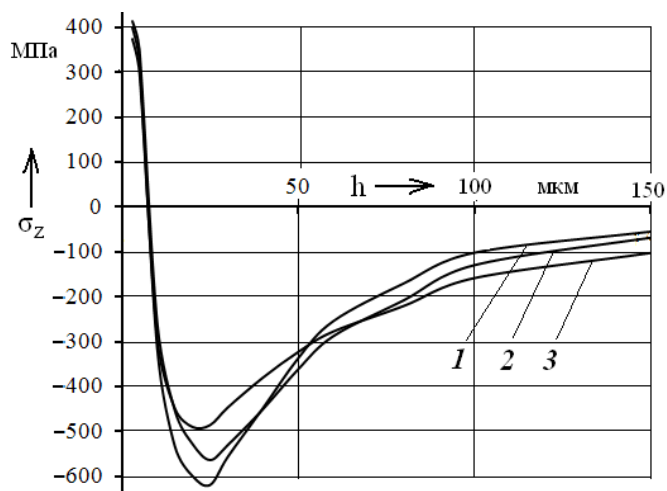


Рис. 3.16. Эпюры остаточных напряжений после комбинированной обработки заготовок из стали 40X13 точением с различной подачей и УЗТВ: 1, 2, 3 – соответственно $S = 0,046$; $0,054$; $0,064$ мм/об; остальные элементы режима обработки: $t = 0,75$ мм; $V_3 = 69,1$ м/мин; $P = 200$ Н

Рис. 3.17. Эпюры остаточных напряжений после комбинированной обработки заготовок из стали 40X13 точением и УЗТВ с различным усилием прижима индентора: 1, 2, 3 – соответственно $P = 100$; 200 ; 300 Н; остальные элементы режима обработки: $t = 0,75$ мм; $V_3 = 69,1$ м/мин; $S = 0,054$ мм/об



С увеличением силы прижима индентора, как и в случае с обработкой заготовок из высокопрочной стали 30ХГСА, происходит увеличение количества дислокаций и рост сжимающих остаточных напряжений. Однако, это отмечено лишь для глубин ПС свыше 80 мкм. На меньших глубинах при обработке с $P = 300$ Н наблюдается уменьшение сжимающих ТОН, что может быть связано с явлением перенаклепа и началом разупрочнения материала ПС заготовки.

Результаты экспериментальных исследований по оценке влияния глубины резания t в процессе обработки заготовок из двухфазной аустенитно-ферритной коррозионно-стойкой стали 07X16H6 приведены на рис. 3.18.

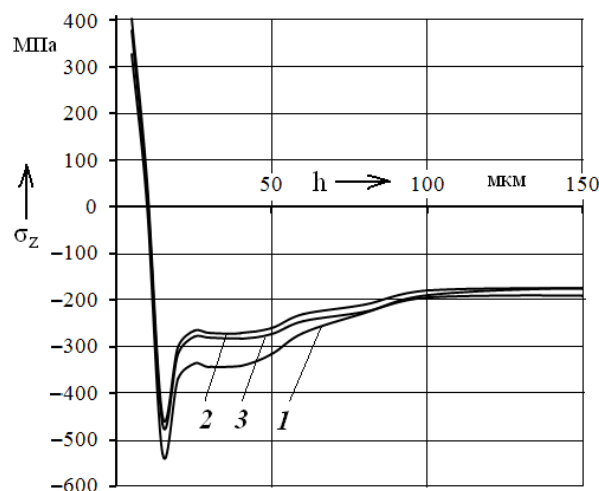
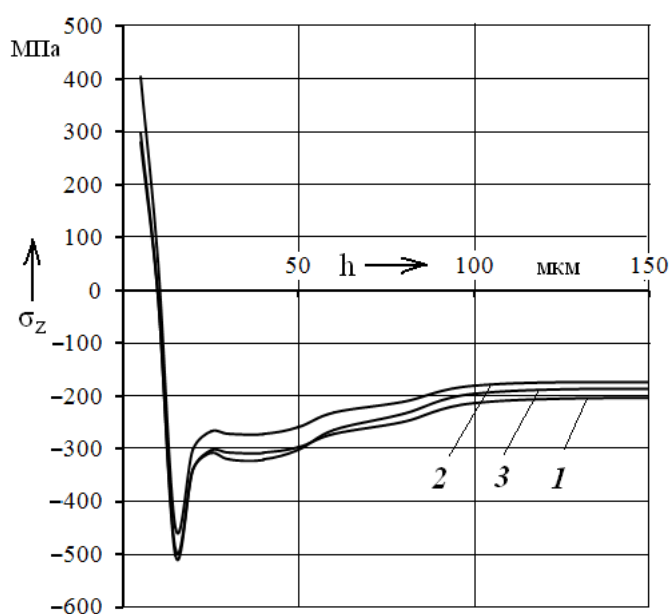


Рис. 3.18. Эпюры остаточных напряжений после комбинированной обработки заготовок из стали 07X16H6 точением с различной глубиной резания и УЗТВ: 1, 2, 3 – соответственно $t = 0,5$; 0,75; 1,0 мм; остальные элементы режима обработки: $V_3 = 59,3$ м/мин; $S = 0,054$ мм/об; $P = 200$ Н

В начальный момент с увеличением значения t до 0,75 мм наблюдается снижение абсолютного значения сжимающих остаточных напряжений. При дальнейшем увеличении глубины резания t влияние радиальной составляющей сил обработки становится доминирующим, что выражается в увеличении величины сжимающих ТОН и упрочнению материала ПС. Влияние окружной скорости заготовки при комбинированной обработке точением и УЗТВ на напряженно-деформированное состояние ПС продемонстрировано на рис. 3.19.

Рис. 3.19. Эпюры остаточных напряжений после комбинированной обработки заготовок из стали 07X16H6 точением и УЗТВ с различной окружной скоростью заготовки: 1, 2, 3 – соответственно $V_3 = 47,1$; 59,3; 75,4 м/мин; остальные элементы режима обработки: $t = 0,75$ мм; $S = 0,054$ мм/об; $P = 200$ Н



Как видно из графиков, при увеличении V_3 до 59,3 м/мин доминирующее влияние на формирование ТОН оказывают возникающие в зоне обработки контактные температуры, приводящие к отпускным процессам и релаксации сжимающих напряжений. Дальнейшее увеличение V_3 ведет к росту сил обработки и доминированию силового фактора и формированию больших сжимающих ТОН.

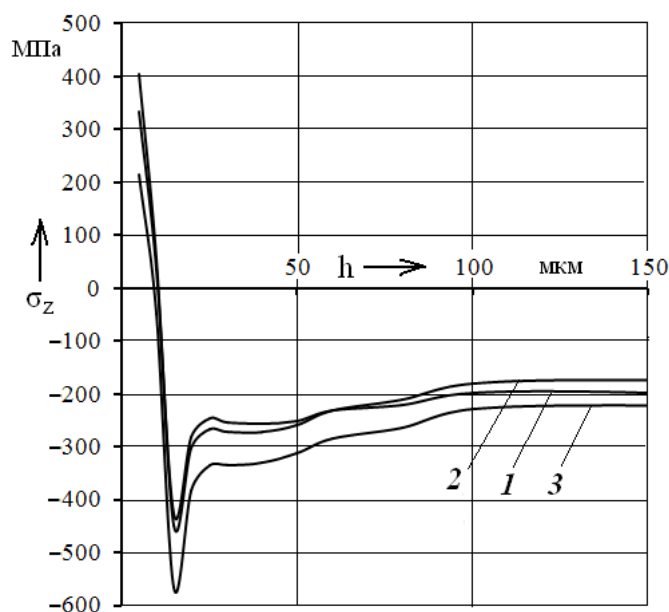
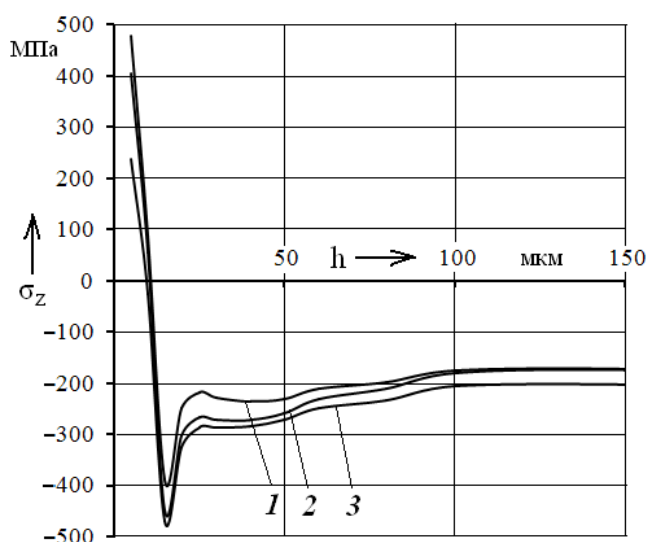


Рис. 3.20. Эпюры остаточных напряжений после комбинированной обработки заготовок из стали 07X16H6 точением с различной подачей и УЗТВ: 1, 2, 3 – соответственно $S = 0,046; 0,054; 0,064$ мм/об; остальные элементы режима обработки: $t = 0,75$ мм; $V_3 = 59,3$ м/мин; $P = 200$ Н

Рис. 3.21. Эпюры остаточных напряжений после комбинированной обработки заготовок из стали 07X16H6 точением и УЗТВ с различным усилием прижима индентора: 1, 2, 3 – соответственно $P = 100; 200; 300$ Н; остальные элементы режима обработки: $t = 0,75$ мм; $V_3 = 59,3$ м/мин; $S = 0,054$ мм/об



Результаты экспериментальных исследований по оценке влияния на ТОН и ФС образцов из титановых сплавов ВТ9 и ВТЗ-1 глубины резания, окружной ско-

рости заготовки, продольной подачи и усилия прижима выглаживателя представлены на рис. 3.22-3.25.

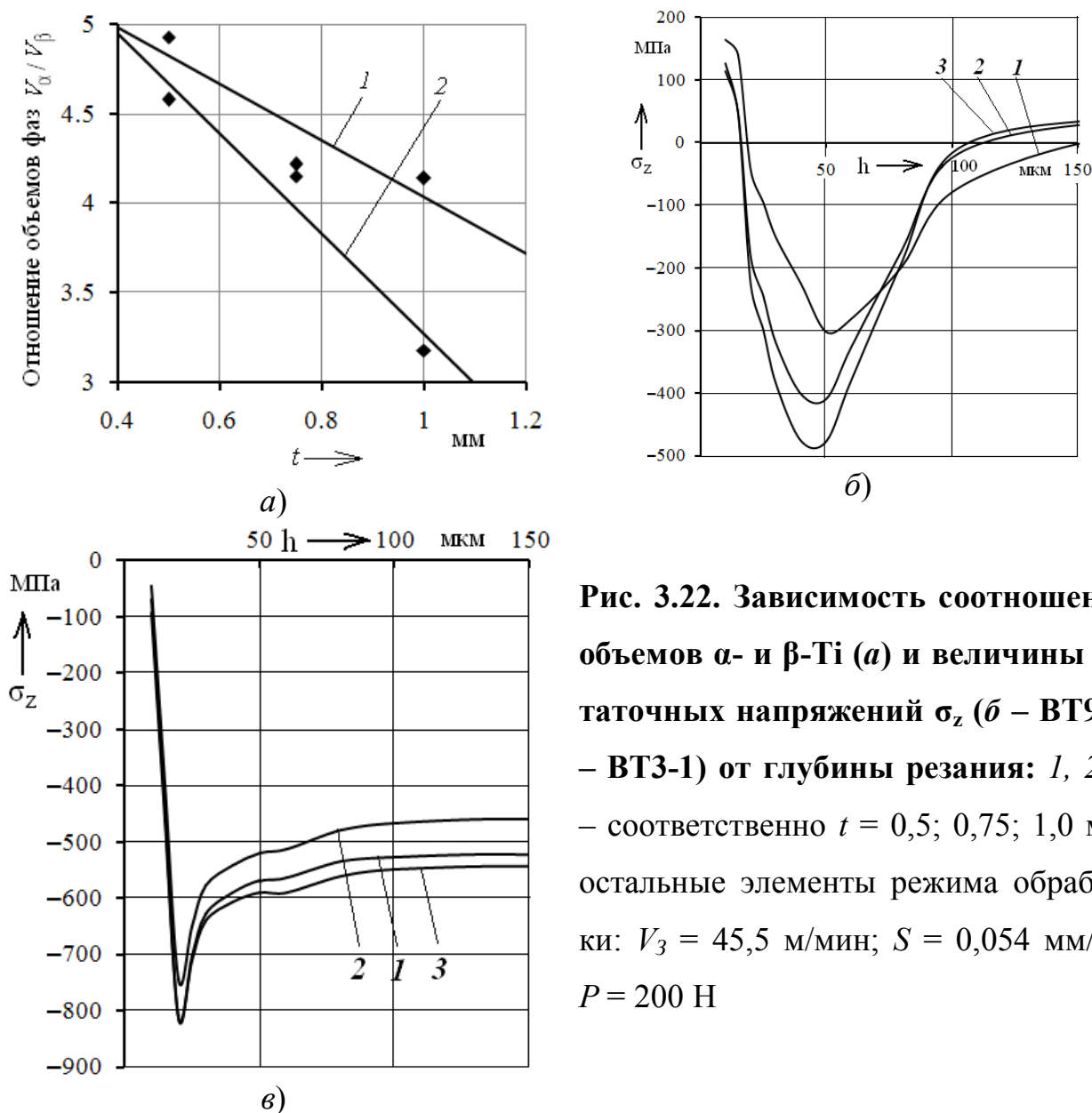


Рис. 3.22. Зависимость соотношения объемов α - и β -Ti (а) и величины остаточных напряжений σ_z (б – ВТ9; в – ВТЗ-1) от глубины резания: 1, 2, 3 – соответственно $t = 0,5; 0,75; 1,0$ мм; остальные элементы режима обработки: $V_3 = 45,5$ м/мин; $S = 0,054$ мм/об; $P = 200$ Н

Анализ результатов исследований показывает, что элементы режима комбинированной обработки оказывают неоднозначное влияние на величину ТОН и соотношение объемов фаз титана в ПС заготовок из разных по химическому составу титановых сплавов.

Наибольшее влияние на изменение ФС поверхностного слоя заготовок и величины ТОН при комбинированной обработке, как следует из анализа полученных экспериментальных данных, оказывает глубина резания t (см. рис. 3.22), уве-

личение которой способствует существенному сокращению α -фазы по сравнению с β -фазой в ПС заготовок из рассматриваемых сплавов. На наш взгляд это связано с возрастанием температуры в зоне обработки и ускорением превращений типа α -Ti $\rightarrow$ β -Ti.

Приведенные на рис. 3.22, б результаты исследований по оценке влияния комбинированной обработки точением и УЗТВ с различной глубиной резания t на остаточные напряжения в ПС заготовок из титанового сплава ВТ9 демонстрируют, что до глубины 80 мкм сжимающие напряжения с ростом параметра t увеличиваются (ПС упрочняется). На глубине ПС свыше 80 мкм вследствие перераспределения ТОН наблюдается обратная зависимость – с увеличением глубины резания ТОН из области сжимающих переходят в растягивающие.

Увеличение глубины резания при обработке заготовок из сплава ВТЗ-1 на первоначальном этапе (до 0,75 мм) приводят к снижению величины сжимающих напряжений вследствие роста температур и образования β -фазы (см. рис. 3.22, а). Однако, дальнейшее увеличение t и связанный с этим рост радиальной составляющей силы обработки приводят к возрастанию количества дислокаций в материале ПС и, как следствие, формированию больших величин сжимающих ТОН.

С увеличением продольной подачи S (см. рис. 3.23, а) и усилия прижима выглаживателя P (см. рис. 3.24, а) происходит распад β -титана (т.е. активизация обратного перехода β -Ti $\rightarrow$ α -Ti). Это приводит к упрочнению материала ПС (снижению растягивающих напряжений в заготовках из сплава ВТ9 и росту сжимающих напряжений для сплава ВТЗ-1). По-видимому, это объясняется интенсификацией процессов пластической деформации и распадом β -титана под воздействием возрастающего давления в зоне контакта инструмента с заготовкой.

Следует отметить, что с увеличением усилия прижима выглаживателя при обработке заготовок из титановых сплавов до 300 Н, наблюдается некоторое снижение уровня сжимающих ТОН, что, вероятно, свидетельствует о начале разупрочнения материала ПС вследствие перенаклепа.

На рис. 3.23, б показано влияние изменений подачи S на характер распределения и величину ТОН в ПС заготовок из сплава ВТ9 при комбинированной обра-

ботке точением и УЗТВ. Как и в случае с глубиной резания (рис. 3.22, б) до глубины 70 мкм наблюдается рост сжимающих напряжений с увеличением параметра S , но, из-за перераспределения ТОН, на глубине ПС свыше 70 мкм видна обратная зависимость. Рост сжимающих напряжений может быть связан с распадом β -титана и переходом его в α -фазу.

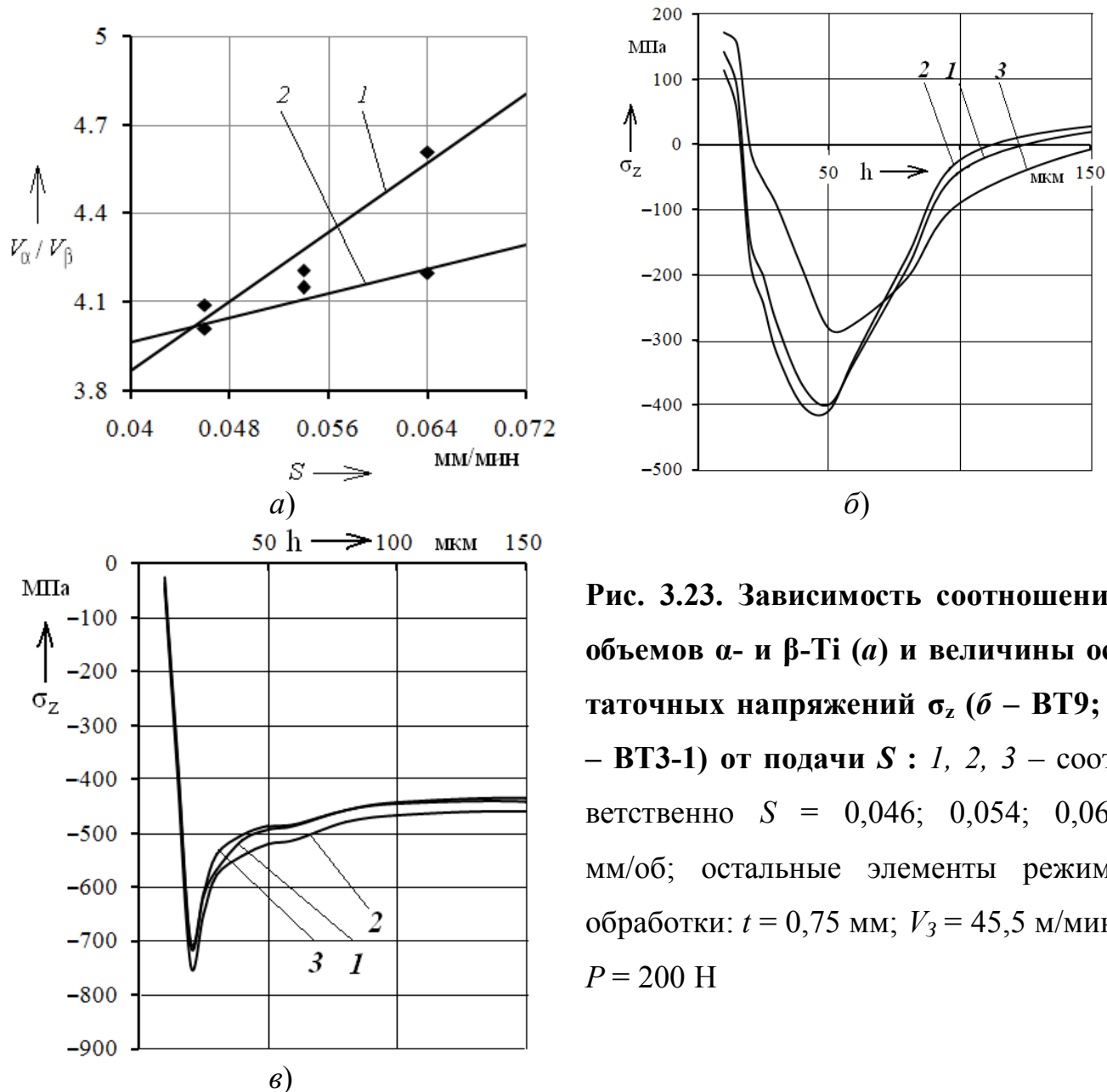


Рис. 3.23. Зависимость соотношения объемов α - и β -Ti (а) и величины остаточных напряжений σ_z (б – ВТ9; в – ВТЗ-1) от подачи S : 1, 2, 3 – соответственно $S = 0,046$; $0,054$; $0,064$ мм/об; остальные элементы режима обработки: $t = 0,75$ мм; $V_3 = 45,5$ м/мин; $P = 200$ Н

Увеличение усилия прижима индентора P при комбинированной обработке заготовок из сплава ВТ9 (см. рис. 3.24, б) вызывает увеличение абсолютной величины сжимающих ТОН. На наш взгляд, это объясняется ростом количества дислокаций в ПС, а также интенсификацией обратного фазового перехода $\beta \rightarrow \alpha$ под

действием контактного давления в зоне выглаживания. Так как контактные температуры при УЗТВ крайне малы, то релаксация полученных напряжений вследствие отпускных процессов незначительна.

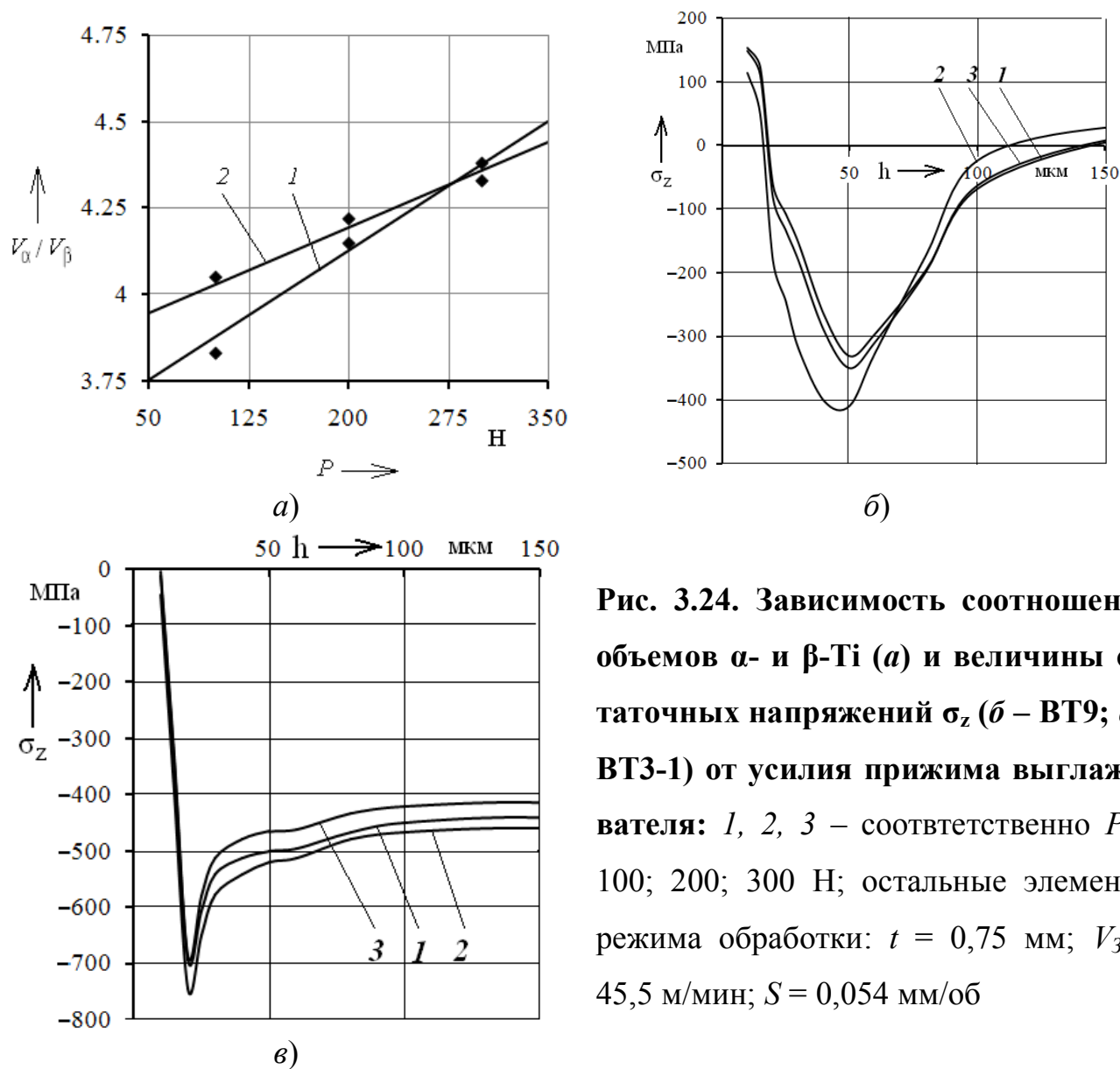


Рис. 3.24. Зависимость соотношения объемов α - и β -Ti (а) и величины остаточных напряжений σ_z (б – ВТ9; в – ВТ3-1) от усилия прижима выглаживателя: 1, 2, 3 – соответственно $P = 100; 200; 300$ Н; остальные элементы режима обработки: $t = 0,75$ мм; $V_3 = 45,5$ м/мин; $S = 0,054$ мм/об

Увеличение усилия прижима индентора до 200 Н при обработке образцов из титанового сплава ВТ3-1 (рис. 3.24, в) сопровождается увеличением абсолютного значения сжимающих остаточных напряжений. Однако, результаты исследований, полученные при обработке с $P = 300$ Н демонстрируют уменьшение сжимающих ТОН. Это, на наш взгляд, связано с увеличением температуры обработки, началом отпускного разупрочнения ПС и может быть отнесено к особенно-

стям данного сплава, выражающимся в доминировании теплового фактора при формировании остаточных напряжений.

Увеличение окружной скорости заготовки V_z может оказывать различное влияние на изменение фазового состава и уровня остаточных напряжений в ПС образцов из разных титановых сплавов (см. рис. 3.25).

При обработке заготовок из сплава ВТЗ-1 увеличение окружной скорости V_z способствует образованию α -фазы и росту нежелательных растягивающих остаточных напряжений. Для сплава ВТ9 эта зависимость носит обратный характер: с увеличением окружной скорости активизируется распад β -фазы. На наш взгляд, это объясняется различиями в химическом составе сплавов.

Так, сплав ВТЗ-1 в качестве основного легирующего элемента содержит железо, количество которого практически в 3 раза больше, чем в ВТ9 (0,7% против 0,25%). Повышенное содержание железа увеличивает склонность титановых сплавов к образованию интерметаллидов состава $TiFe$ и $TiFe_2$ [75]. В то же время ВТ9 характеризуются повышенным (по сравнению с ВТЗ-1) содержанием циркония (до 2% для ВТ9 и до 0,5% для ВТЗ-1).

Подобные различия, а также существенное увеличение контактных температур при увеличении окружной скорости заготовки, обуславливает противоположный характер изменения ФС материала ПС образцов.

Из результатов исследований следует, что окружная скорость заготовки V_z оказывает незначительное влияние на напряженно-деформированное состояние ПС заготовок из рассматриваемых сплавов (рис. 3.25, б – в), причем её увеличение вызывает снижение абсолютной величины сжимающих остаточных напряжений. Это связано, на наш взгляд, с существенным ростом теплонапряженности процесса комбинированной обработки и интенсификацией структурно-фазовых переходов.

Таким образом, выполненные экспериментальные исследования показали, что использование комбинированной обработки точением и УЗТВ на предварительных этапах ТП позволяет осуществлять формирование заданного уровня ТОН и ФС материала поверхностного слоя заготовок из одно- и двухфазных сталей и

титановых сплавов в соответствии с техническими требованиями на ответственные детали, работающие в условиях постоянных знакопеременных динамических нагрузок (например, детали высоконагруженных узлов летательных аппаратов и газотурбинных двигателей). Однако, из анализов результатов исследований следует, что элементы режима обработки неоднозначно влияют на изменение напряженно-деформированного состояния ПС и соотношение фаз в нём. Особенно резко различается характер изменения фазового состава титановых сплавов ВТ9 и ВТЗ-1, схожих по механическим свойствам, но существенно отличающихся по химическому составу.

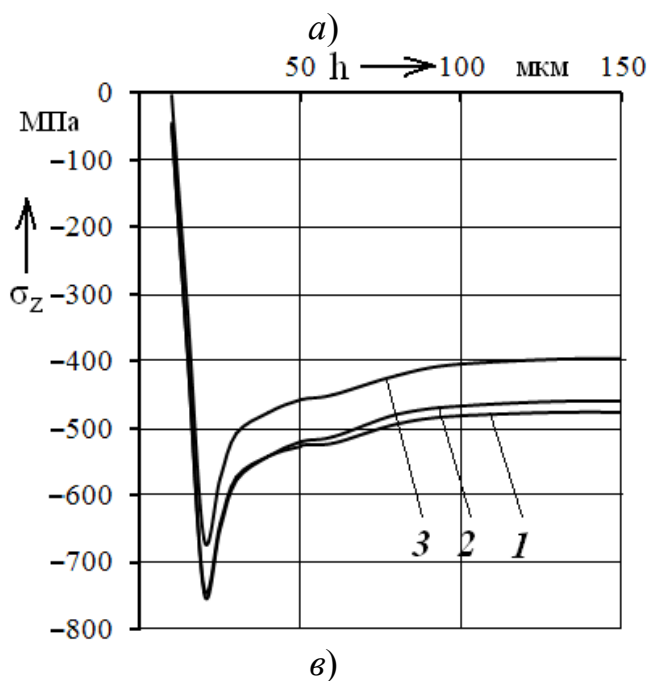
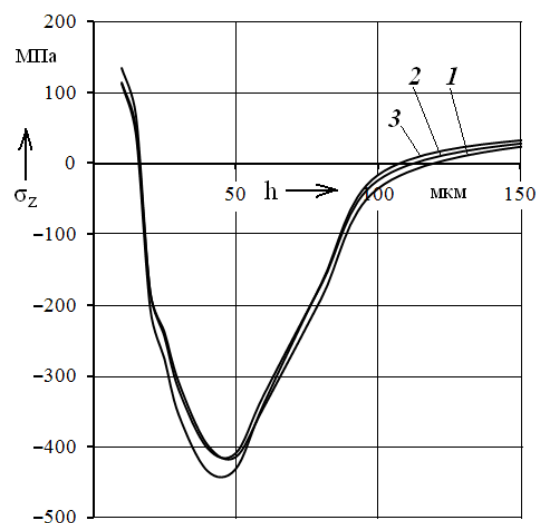
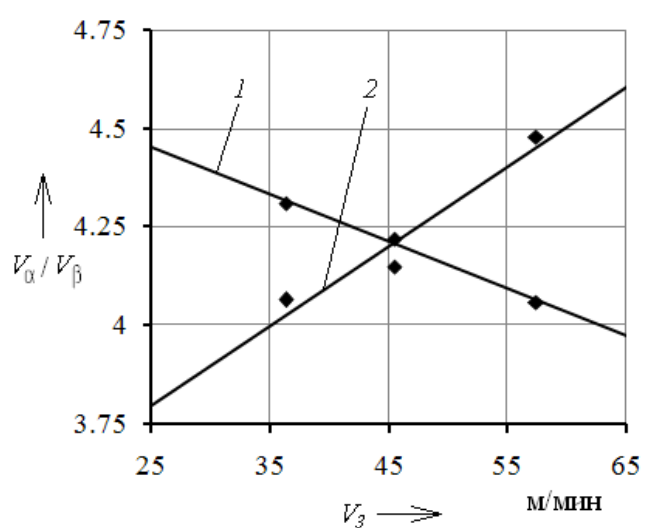


Рис. 3.25. Зависимость соотношения объемов α - и β -Ti (a) и величины остаточных напряжений σ_z (б – ВТ9; в – ВТ3-1) при изменении окружной скорости заготовки: 1, 2, 3 – соответственно $V_3 = 36,4; 45,5; 57,4$ м/мин; остальные элементы режима обработки: $t = 0,75$ мм; $S = 0,055$ мм/об; $P = 200$ Н

К назначению элементов режима комбинированной обработки следует подходить с учётом заданных технических требований и химсостава материалов обрабатываемых заготовок, стремясь обеспечить не только заданный уровень ТОН и фазовый состав ПС, но и максимально возможную производительность обработки. Как показали результаты исследований, наибольшие резервы для этой цели открываются при варьировании глубиной резания t и усилием прижима твердосплавного выглаживателя P .

3.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЗАГОТОВОК

Исследования процессов технологического наследования ТОН и определение коэффициентов наследования K_H производили на образцах, изготовленных из пяти представителей труднообрабатываемых материалов (см. табл. 3.1 – 3.4). Все заготовки предварительно подвергали комбинированной обработке точением и УЗТВ, после чего шлифовали с врезной подачей.

Значения элементов режима комбинированной обработки определяли в ходе предварительных исследований (см. параграф 3.2) таким образом, чтобы обеспечивать в ПС обработанных заготовок максимально и минимально возможные, а также средние по абсолютной величине сжимающие ТОН на глубине припуска $Z_{шл}$, оставленного для последующего шлифования. Это необходимо для точного расчета коэффициента наследования остаточных напряжений при наименьших временных и материальных затратах на проведение натурных экспериментов.

На рис. 3.26 – 3.30 представлены результаты экспериментальных исследований технологического наследования остаточных напряжений в процессе комбинированной обработки точением и УЗТВ с последующим врезным шлифованием. Из полученных схем видно, что ТОН, сформированные на глубине припуска под последующую механическую обработку, оказывают значительное влияние на напряженно-деформированное состояние ПС шлифованных образцов.

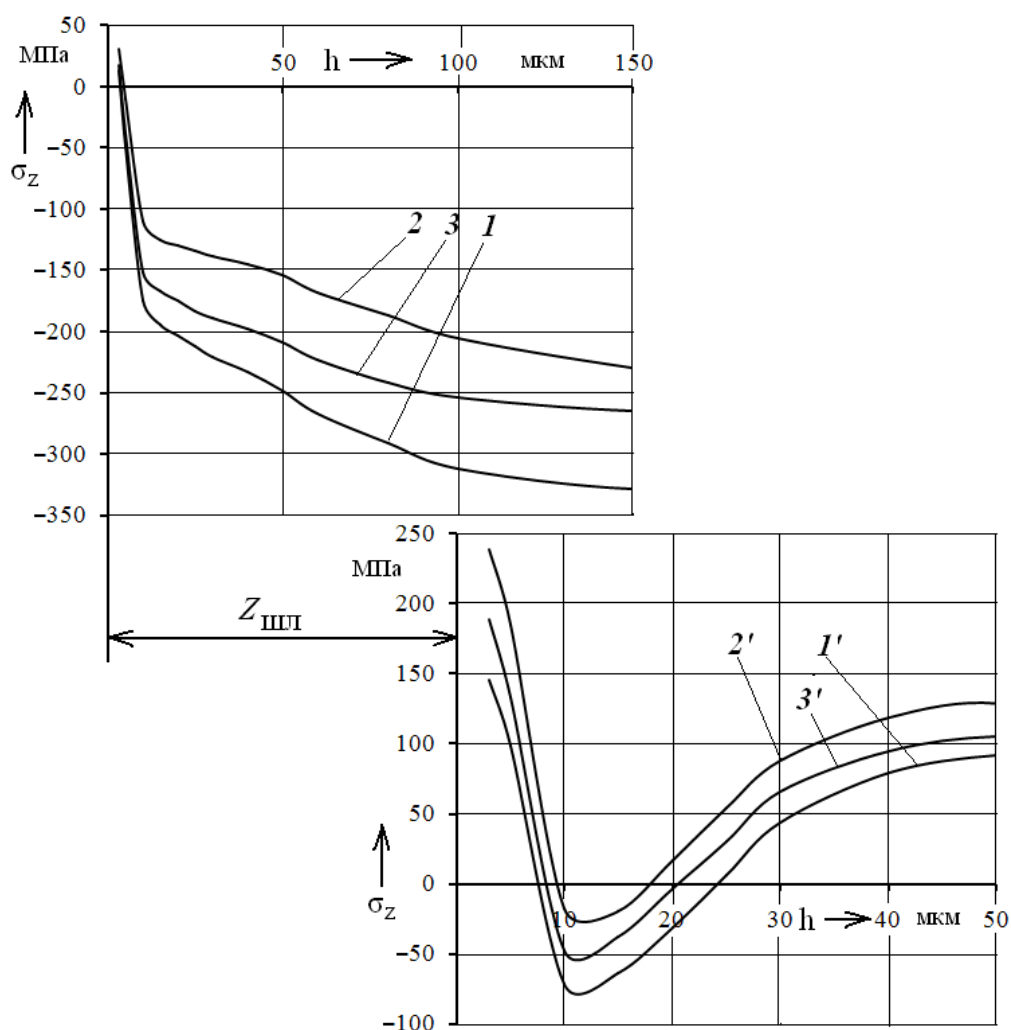


Рис. 3.26. Схема технологического наследования остаточных напряжений в поверхностном слое заготовок из стали 30ХГСА при различных режимах предварительной обработки точением и УЗТВ: 1 – $t = 0.75$ мм, $V_3 = 35.2$ м/мин, $S = 0.064$ мм/об, $P = 100$ Н; 2 – $t = 1$ мм, $V_3 = 54.9$ м/мин, $S = 0.046$ мм/об, $P = 200$ Н; 3 – $t = 0.5$ мм, $V_3 = 44$ м/мин, $S = 0.054$ мм/об, $P = 300$ Н; 1, 2, 3 – ТОН после комбинированного точения и УЗТВ; 1', 2', 3' – ТОН после врезного шлифования

Так, сформированные в ходе комбинированного точения и УЗТВ по первому режиму (кривая 1 на рис. 3.26) заготовок из стали 30ХГСА сжимающие напряжения на глубине 100 мкм, частично «перешли» в ПС шлифованной заготовки, обеспечив там минимальные растягивающие напряжения (кривая 1' на рис. 3.26)

по сравнению с двумя другими вариантами комбинированной обработки (кривые 2, 2', 3 и 3' на рис. 3.26).

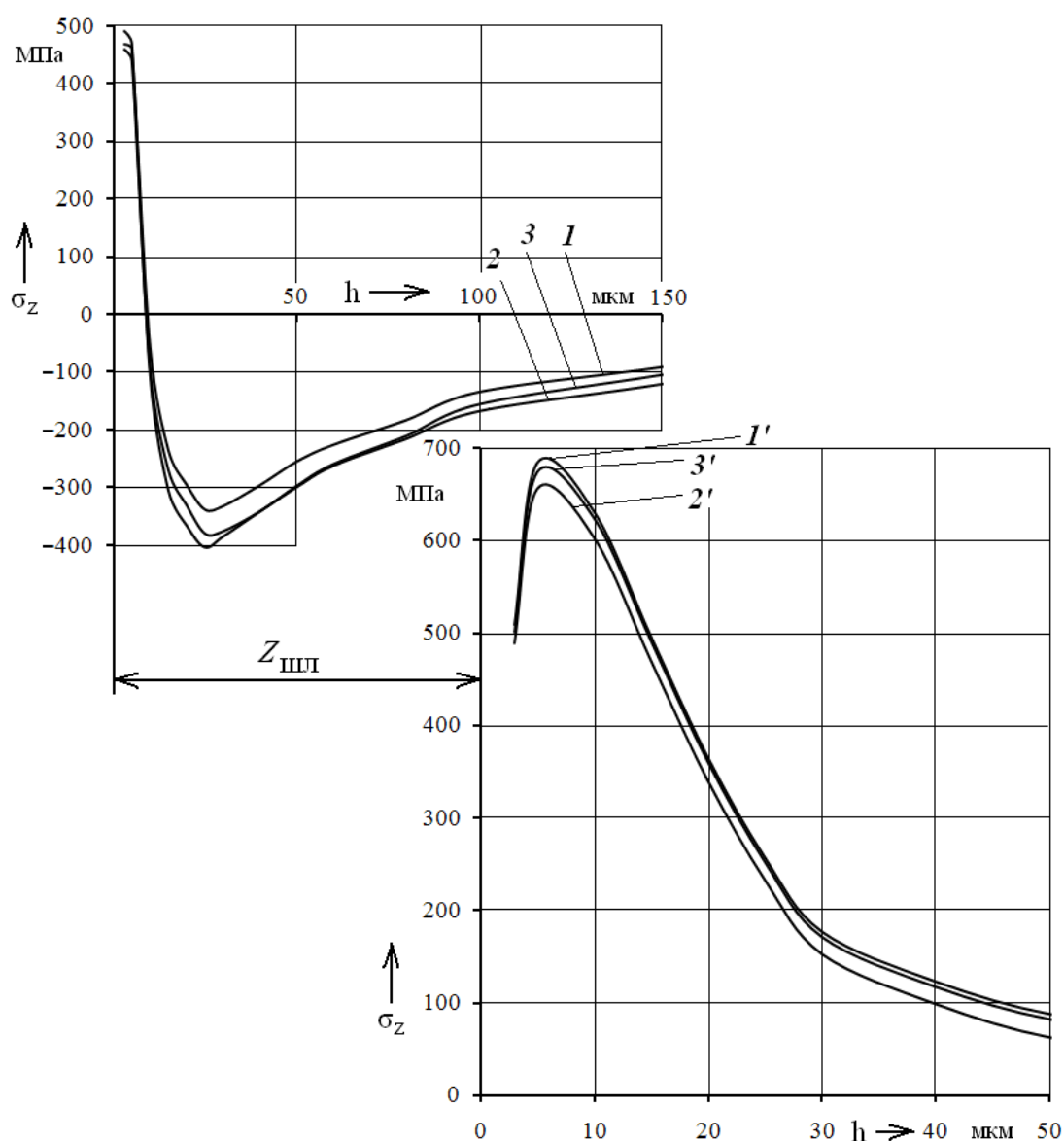


Рис. 3.27. Схема технологического наследования остаточных напряжений в поверхностном слое заготовок из стали 40X13 при различных режимах предварительной обработки точением и УЗТВ: 1 – $t = 0.75$ мм, $V_3 = 91.1$ м/мин, $S = 0.054$ мм/об, $P = 300$ Н; 2 – $t = 1$ мм, $V_3 = 57.4$ м/мин, $S = 0.064$ мм/об, $P = 200$ Н; 3 – $t = 0.5$ мм, $V_3 = 72.8$ м/мин, $S = 0.046$ мм/об, $P = 100$ Н; 1, 2, 3 – ТОН после комбинированного точения и УЗТВ; 1', 2', 3' – ТОН после врезного шлифования

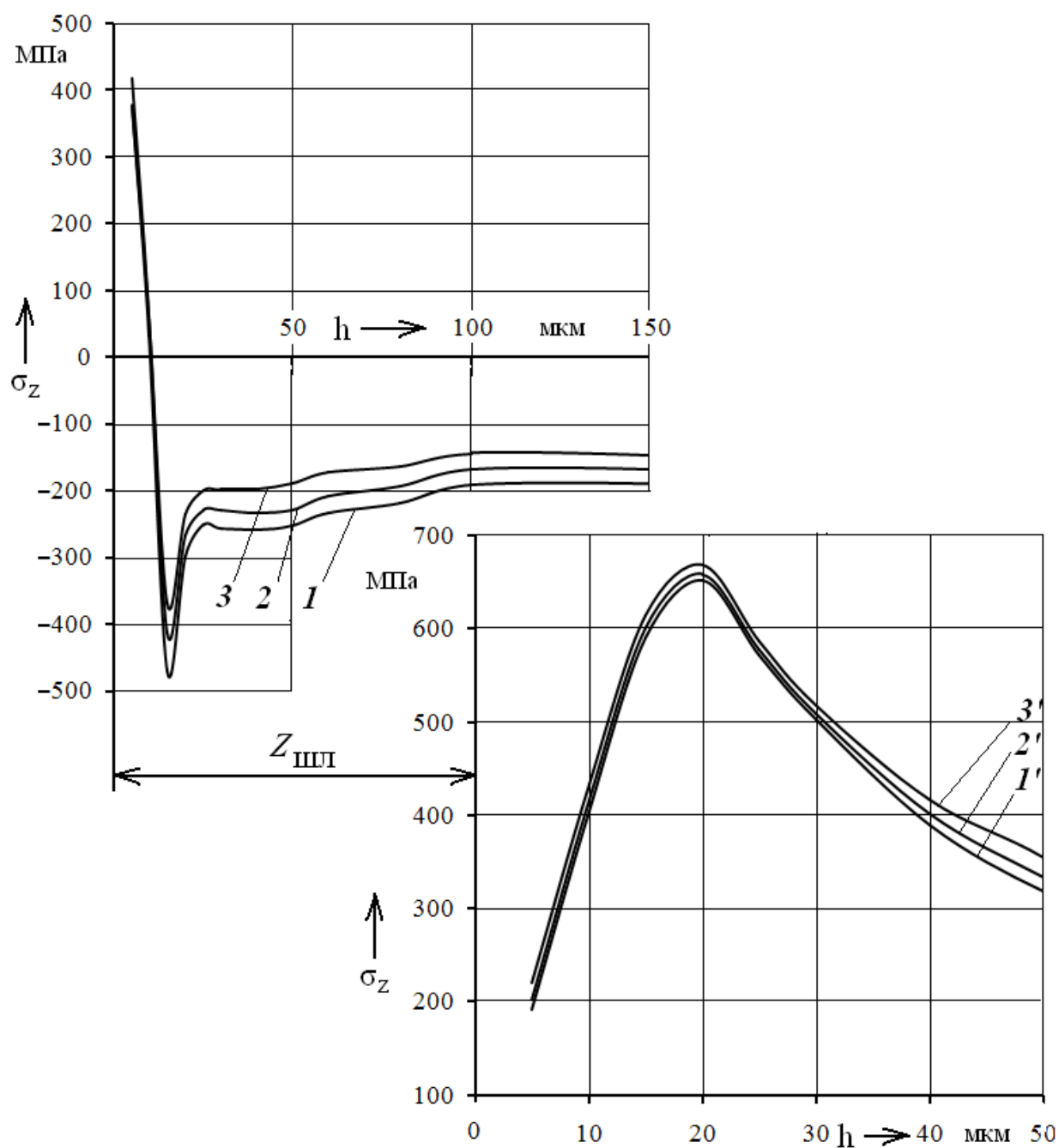


Рис. 3.28. Схема технологического наследования остаточных напряжений в поверхностном слое заготовок из стали 07X16H6 при различных режимах предварительной обработки точением и УЗТВ: $1 - t = 0.75$ мм, $V_3 = 59.3$ м/мин, $S = 0.054$ мм/об, $P = 100$ Н; $2 - t = 0.5$ мм, $V_3 = 75.4$ м/мин, $S = 0.046$ мм/об, $P = 200$ Н; $3 - t = 1$ мм, $V_3 = 47.1$ м/мин, $S = 0.064$ мм/об, $P = 300$ Н; $1, 2, 3$ – ТОН после комбинированного точения и УЗТВ; $1', 2', 3'$ – ТОН после врезного шлифования

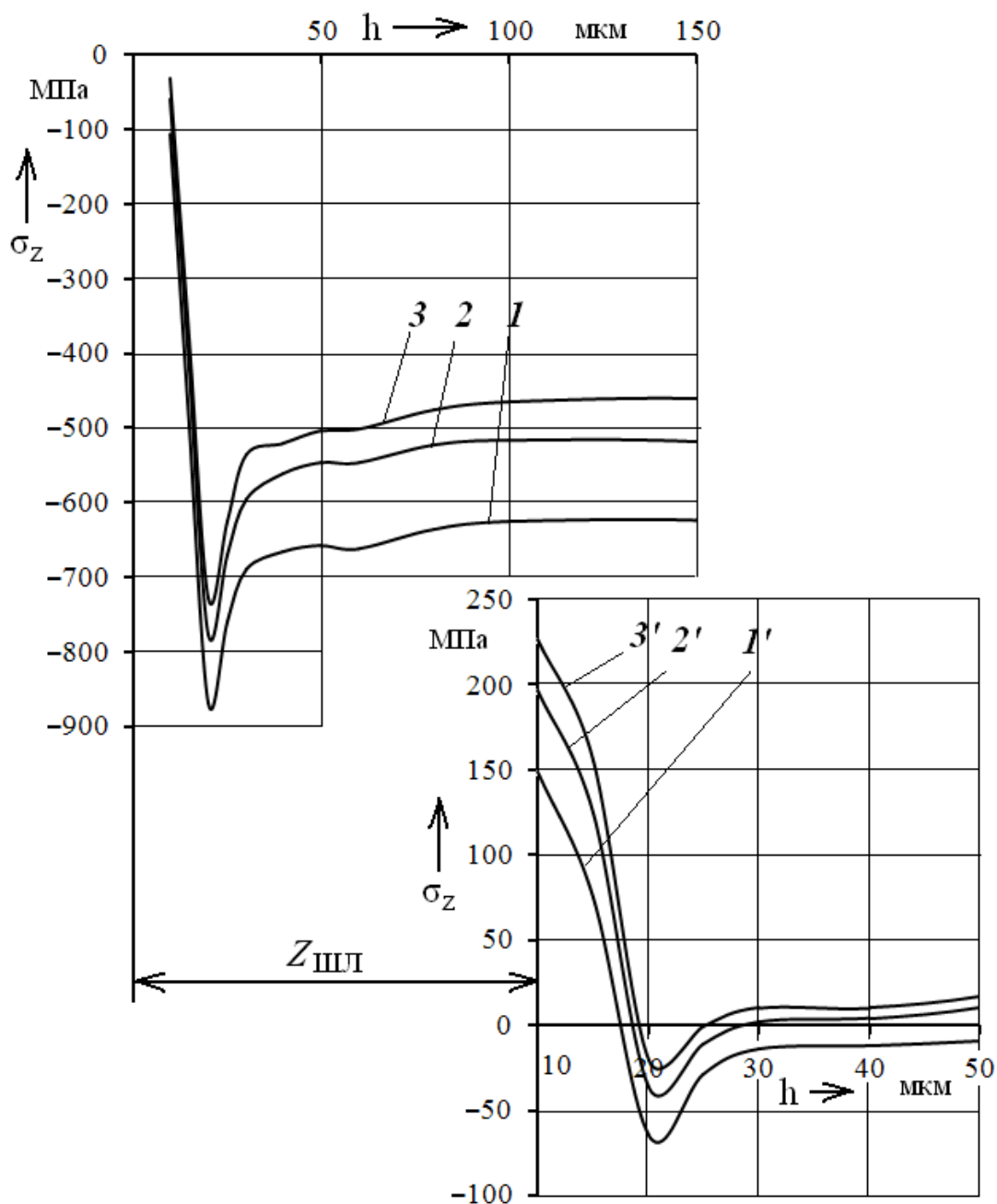


Рис. 3.30. Схема технологического наследования остаточных напряжений в поверхностном слое заготовок из титанового сплава ВТ3-1 при различных режимах предварительной обработки точением и УЗТВ: 1 – $t = 0.75$ мм, $V_3 = 63.5$ м/мин, $S = 0.064$ мм/об, $P = 300$ Н; 2 – $t = 0.5$ мм, $V_3 = 50.8$ м/мин, $S = 0.046$ мм/об, $P = 100$ Н; 3 – $t = 1$ мм, $V_3 = 40.6$ м/мин, $S = 0.054$ мм/об, $P = 200$ Н; 1, 2, 3 – ТОН после комбинированного точения и УЗТВ; 1', 2', 3' – ТОН после врезного шлифования

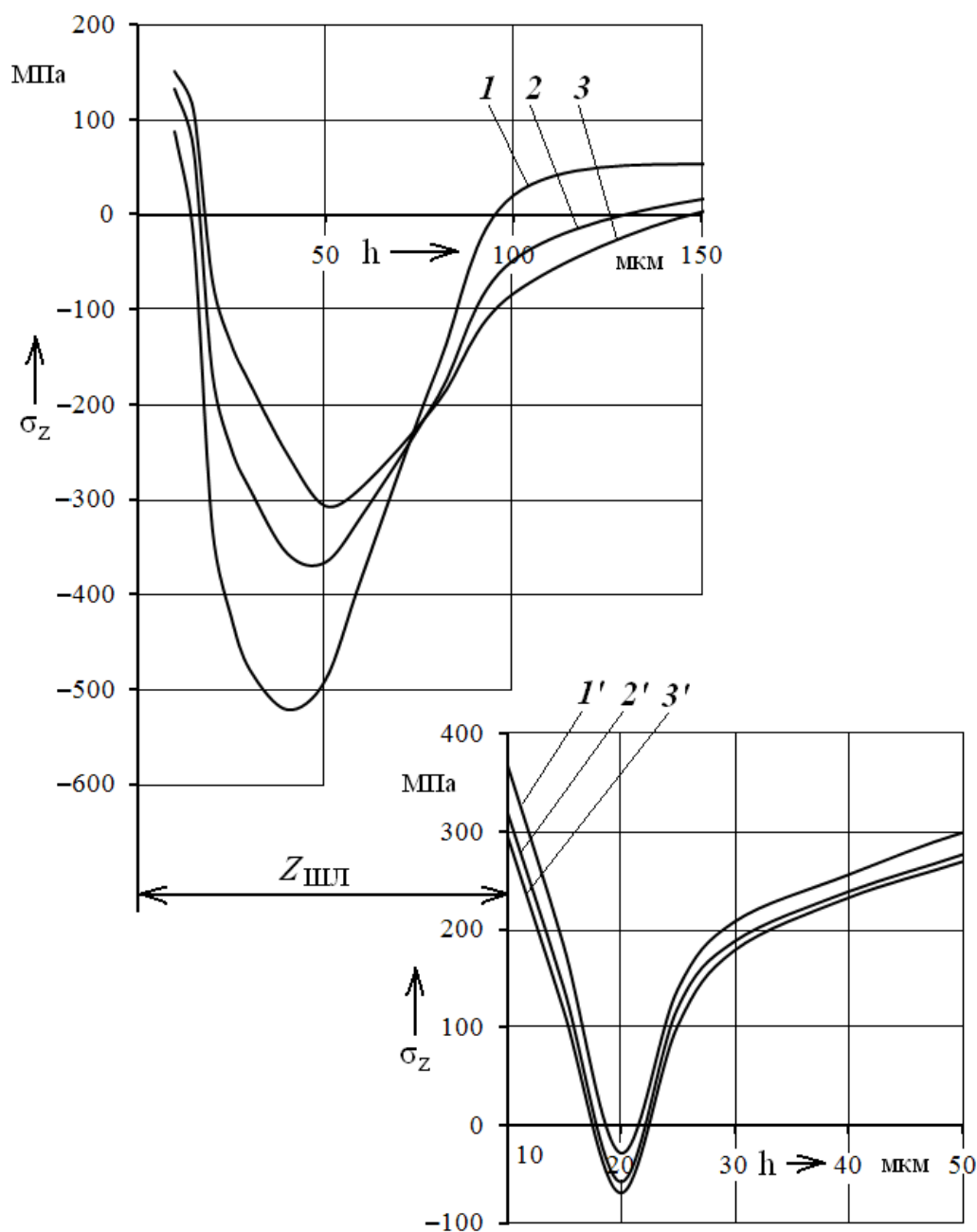


Рис. 3.29. Схема технологического наследования остаточных напряжений в поверхностном слое заготовок из титанового сплава ВТ9 при различных режимах предварительной обработки точением и УЗТВ: 1 – $t = 1$ мм, $V_3 = 57.4$ м/мин, $S = 0.054$ мм/об, $P = 100$ Н; 2 – $t = 0.75$ мм, $V_3 = 45.5$ м/мин, $S = 0.046$ мм/об, $P = 300$ Н; 3 – $t = 0.5$ мм, $V_3 = 36.4$ м/мин, $S = 0.064$ мм/об, $P = 200$ Н; 1, 2, 3 – ТОН после комбинированного точения и УЗТВ; 1', 2', 3' – ТОН после врезного шлифования

Сравнительный анализ графических зависимостей, представленных на схемах технологического наследования отличается сложностью и большой трудоемкостью. На наш взгляд, достаточно полную и оперативную информацию о степени влияния технологического наследования на ТОН в ПС заготовок может дать коэффициент наследования K_H . Последний определяли следующим образом:

1) Из представленных на рис. 3.26 – 3.30 экспериментальных данных выбирали два варианта эпюр ТОН после предварительной обработки точением и УЗТВ на разных режимах и последующего врезного шлифования. Для примера рассмотрим расчет коэффициента наследования при обработке стали 30ХГСА (кривые 1, 2 и 1', 2' на рис. 3.26);

2) Из величины остаточных напряжений на заданной глубине h_A ПС шлифованной заготовки, полученных в ходе обработки по первому варианту (кривая 1' на рис. 3.26), вычитали значение ТОН по второму варианту (кривая 2' на рис. 3.26). Так как операция врезного шлифования выполняется на одном режиме для всех вариантов обработки, то составляющая $\sigma_{i+1}^{TC}(h_A)$ из зависимости (2.1) будет являться величиной постоянной. Припуск на шлифование $Z_{шл} = 0,1$ мм; глубина ПС, для которой определяли коэффициент наследования, $h_A = 0,01$ мм. Таким образом, коэффициент наследования K_H^{1-2} будет равен:

$$\sigma_{i+1}^{1'}(h_A) - \sigma_{i+1}^{2'}(h_A) = K_H^{1-2} \cdot \sigma_i^1(Z_{шл} + h_A) + \sigma_{i+1}^{TC}(h_A) - K_H^{1-2} \cdot \sigma_i^2(Z_{шл} + h_A) - \sigma_{i+1}^{TC}(h_A);$$

$$\sigma_{i+1}^{1'}(h_A) - \sigma_{i+1}^{2'}(h_A) = K_H^{1-2} \cdot (\sigma_i^1(Z_{шл} + h_A) - \sigma_i^2(Z_{шл} + h_A));$$

$$K_H^{1-2} = \frac{\sigma_{i+1}^{1'}(0,01) - \sigma_{i+1}^{2'}(0,01)}{\sigma_i^1(0,11) - \sigma_i^2(0,11)} = \frac{-78 + 12}{-311 + 210} = \frac{-66}{-101} = 0,65.$$

3) Рассчитав аналогичным образом коэффициенты для двух оставшихся вариантов режима обработки, определяли коэффициент наследования K_H как среднее арифметическое из коэффициентов K_H^{1-2} , K_H^{2-3} и K_H^{1-3} . Соответственно, при обработке заготовок из стали 30ХГСА, эти коэффициенты будут равны $K_H^{2-3} = 0,58$ и $K_H^{1-3} = 0,61$. Таким образом, коэффициент наследования ТОН на глубине 0,01 мм будет равен $K_H = 0,61$.

Рассчитанные подобным образом с использованием экспериментальных данных, приведенных на рис. 3.26 – 3.30 коэффициенты наследования остаточных

напряжений представлены на рис. 3.31 и 3.32 в виде графических зависимостей изменения K_H по глубине ПС шлифованных заготовок из исследуемых материалов.

Как следует из рис. 3.31 и 3.32, на самой поверхности заготовки в зоне контакта с инструментом коэффициент наследования стремится к 1 (т.е. релаксация практически отсутствует и остаточные напряжения полностью переносятся с предшествующей операции механической обработки заготовки). На большей глубине наблюдается значительное (для сталей 30ХГСА и 07Х16Н6, а также титанового сплава ВТ9) снижение величины K_H , однако, на глубине ПС порядка 30...40 мкм коэффициент наследования вновь начинает расти.

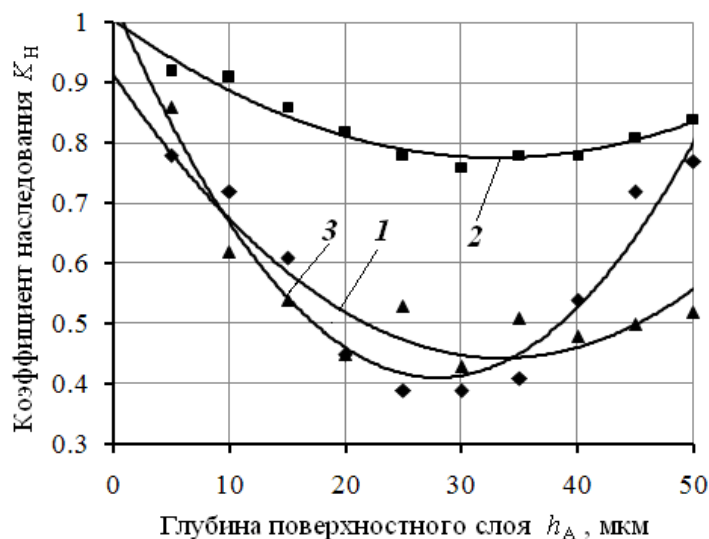


Рис. 3.31. Графики изменения коэффициента наследования K_H остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя заготовок из сталей: 1 – 30ХГСА ($\blacktriangle$); 2 – 40Х13 ($\blacksquare$); 3 – 07Х16Н6 ($\blacklozenge$)

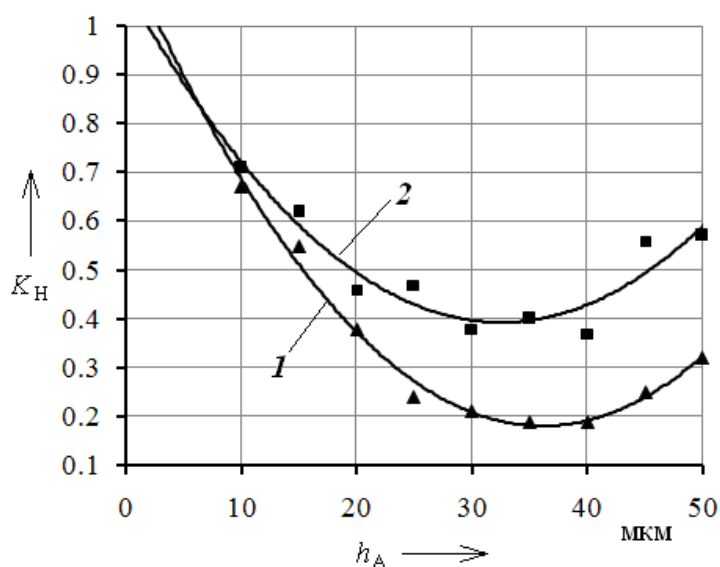


Рис. 3.32. Графики изменения коэффициента наследования K_H остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя заготовок из титановых сплавов: 1 – ВТ3-1 ($\blacktriangle$); 2 – ВТ9 ($\blacksquare$)

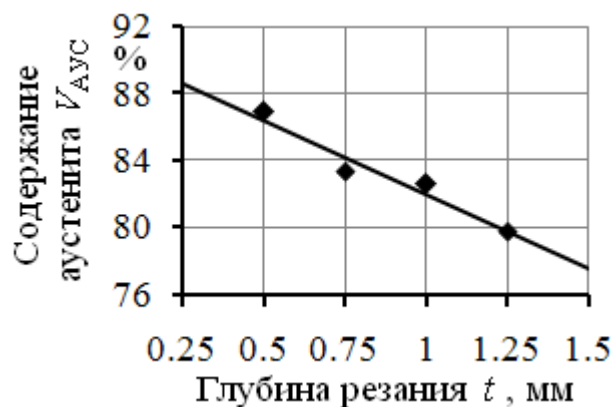
Характер кривых на графических зависимостях (рис. 3.31 и 3.32) идентичен характеру теоретической кривой изменения коэффициента наследования, представленной во второй главе на рис. 2.6. Таким образом, экспериментальные данные подтверждают выдвинутое в параграфе 2.1 настоящей диссертационной работы предположение о влиянии температуры в зоне обработки и свойств исследуемого материала на изменение величины коэффициента наследования по глубине ПС обработанной заготовки.

3.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДОВАНИЯ ФАЗОВОГО СОСТАВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЗАГОТОВОК ИЗ ДВУХФАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Исследования процесса технологического наследования фазового состава ПС заготовок из труднообрабатываемых материалов проводили на образцах из двухфазной аустенитно-мартенситной коррозионно-стойкой стали 07X16H6, а также из жаропрочных титановых сплавов ($\alpha+\beta$)-класса ВТ9 и ВТ3-1. В ходе исследований, выполненных на рентгеновском измерительном комплексе «РИКОР-7», контролировали интенсивность пиков α -железа (мартенсит), γ -железа (аустенит), а также α - и β -титана в образцах, подвергавшихся комбинированной обработке точением и УЗТВ и последующему врезному шлифованию. Затем полученные данные пересчитывали в процентное содержание аустенита в объеме ПС (для стали 07X16H6) и соотношение объемов фаз α -титана V_α и β -титана V_β (для сплавов ВТ3-1 и ВТ9).

Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 3.33 и 3.34.

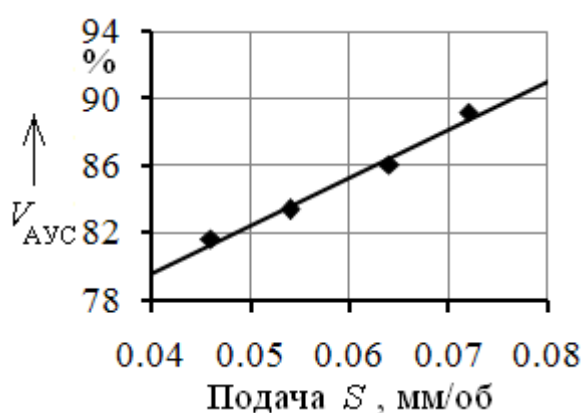
Заготовки предварительно обрабатывали комбинированным точением и УЗТВ на различных режимах, после чего шлифовали с врезной подачей с неизменным режимом. Таким образом определяли влияние элементов режима предварительной обработки (глубины резания t , окружной скорости заготовки V_z , подачи S и усилия прижима индентора P) на процентное содержание аустенита в шлифованных образцах.



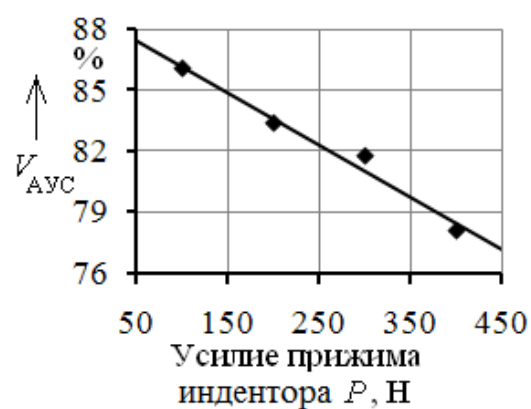
а)



б)



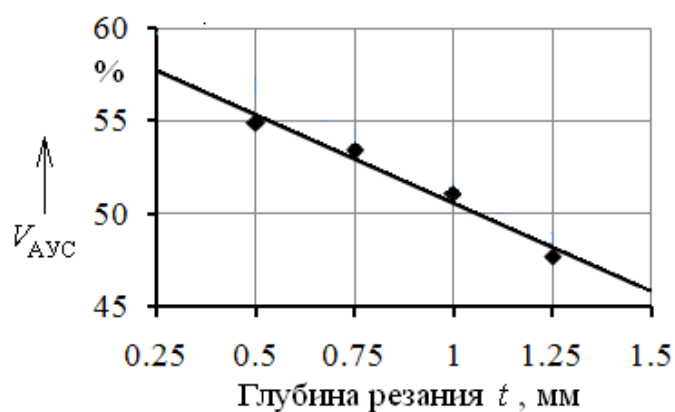
в)



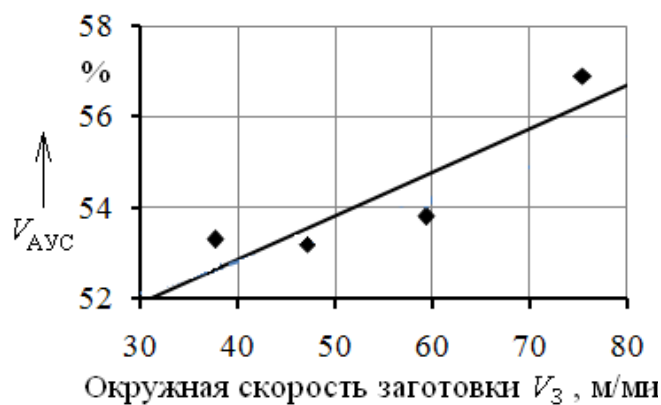
г)

Рис. 3.33. Зависимости содержания аустенита в поверхностном слое заготовок из стали 07X16Н6 от режима комбинированной обработки точением и УЗТВ

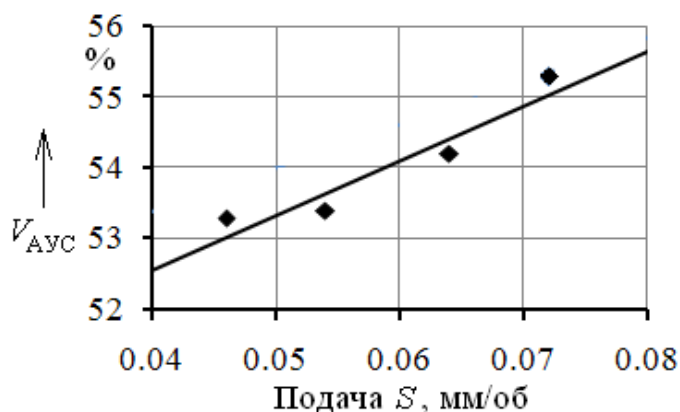
Проанализировав данные графические зависимости (рис. 3.34), можно утверждать, что окружная скорость заготовки $V_з$ (рис. 3.34, б) и подача S (рис. 3.34, в) практически не оказывают влияния на объем аустенита в ПС шлифованных образцов. Изменение его процентного содержания составляет менее 5% от объема. Рост глубины резания t приводит к снижению содержания аустенита в шлифованных заготовках почти на 10% (рис. 3.34, а). Похожая картина наблюдается и при увеличении усилия прижима индентора к заготовке P (рис. 3.34, г), где уменьшение содержания аустенита достигает 17%.



а)



б)



в)



г)

Рис. 3.34. Зависимости содержания аустенита в поверхностном слое шлифованных заготовок из стали 07X16H6 от режима предварительной комбинированной обработки точением и УЗТВ

Полученные результаты (см. рис. 3.33 и 3.34), на наш взгляд, связаны с существенным ростом радиальной составляющей сил обработки при увеличении глубины резания t и усилия прижима индентора к заготовке P , вызывающей распад аустенита, а также с влиянием на образование и распад зерен аустенита ТОН, сформированных в ПС заготовки на этапе предварительной обработки. Увеличение подачи S и окружной скорости заготовки V_3 приводит к росту контактных температур в зоне обработки, что способствует активизации $\alpha \rightarrow \gamma$ превращений. Однако, в связи с относительно небольшой теплонапряженностью процесса ком-

бинированной обработки, контактные температуры оказывают незначительное влияние на ФС материала ПС заготовок из стали 07X16H6.

На рис. 3.35 показаны диаграммы, иллюстрирующие технологическое наследование фазового состава ПС заготовок из титановых сплавов ВТ9 и ВТЗ-1.

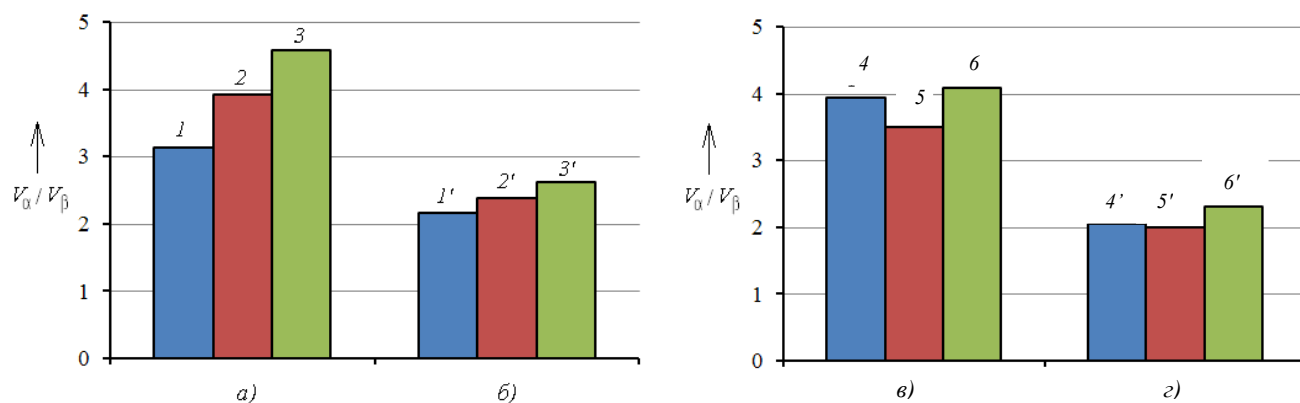


Рис. 3.35. Изменение фазового состава поверхностного слоя заготовок из сплавов ВТ9 (а, б) и ВТЗ-1 (в, г) в ходе комбинированной обработки точением и УЗТВ (1–6) и шлифованием (1'–6'): 1 – $t = 1$ мм, $V_3 = 57.4$ м/мин, $S = 0.054$ мм/об, $P = 100$ Н; 2 – $t = 0.75$ мм, $V_3 = 45.5$ м/мин, $S = 0.046$ мм/об, $P = 300$ Н; 3 – $t = 0.5$ мм, $V_3 = 36.4$ м/мин, $S = 0.064$ мм/об, $P = 200$ Н; 4 – $t = 0.75$ мм, $V_3 = 63.5$ м/мин, $S = 0.064$ мм/об, $P = 300$ Н; 5 – $t = 0.5$ мм, $V_3 = 50.8$ м/мин, $S = 0.046$ мм/об, $P = 100$ Н; 6 – $t = 1$ мм, $V_3 = 40.6$ м/мин, $S = 0.054$ мм/об, $P = 200$ Н

Столбцы 1' – 6' демонстрируют соотношению объемов фаз α - и β -титана в шлифованных образцах, предварительно подвергнутых комбинированной обработке точением и УЗТВ на соответствующих режимах.

Как видно из результатов исследований, соотношение объемов фаз α - и β -титана после комбинированной обработки и шлифования практически одинаково, что наглядно свидетельствует о технологическом наследовании ФС материала поверхностного слоя титановых образцов. Таким образом, формируя на этапе комбинированной обработки наибольший объем α -Ti (столбцы 3 и 6 на рис. 3.35) можно обеспечить максимально возможный (в определенных пределах) объем α -титана и после последующего врезного шлифования (столбцы 3' и 6' на рис. 3.35).

3.5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ РЕЛАКСАЦИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗАГОТОВКАХ ИЗ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Согласно [32], наибольшее влияние на эффективность ультразвукового снятия ТОН оказывает время релаксации τ и усилие прижима индентора P . Экспериментальные исследования эффективности УЗ-релаксации ТОН проводили после операции круглого наружного шлифования на установке, аналогичной показанной на рис. 3.8 – 3.9, отличающейся лишь отсутствием токарного резца.

Как следует из рис. 3.36, эффективность УЗ-релаксации существенно зависит от времени «озвучивания». Причем разница в скорости релаксации (МПа/мин) для материалов, использованных при исследованиях, примерно одинакова и составляет: 140 – 160 МПа/мин для сталей и 70 – 80 МПа/мин для титановых сплавов.

Изменение характера кривой σ_z для стали 30ХГСА (кривая 1 на рис. 3.36, б) после 1,5 мин обработки (существенное снижение скорости релаксации) связано с достижением так называемого «насыщения», что хорошо согласуется с результатами экспериментов, описанных в [32].

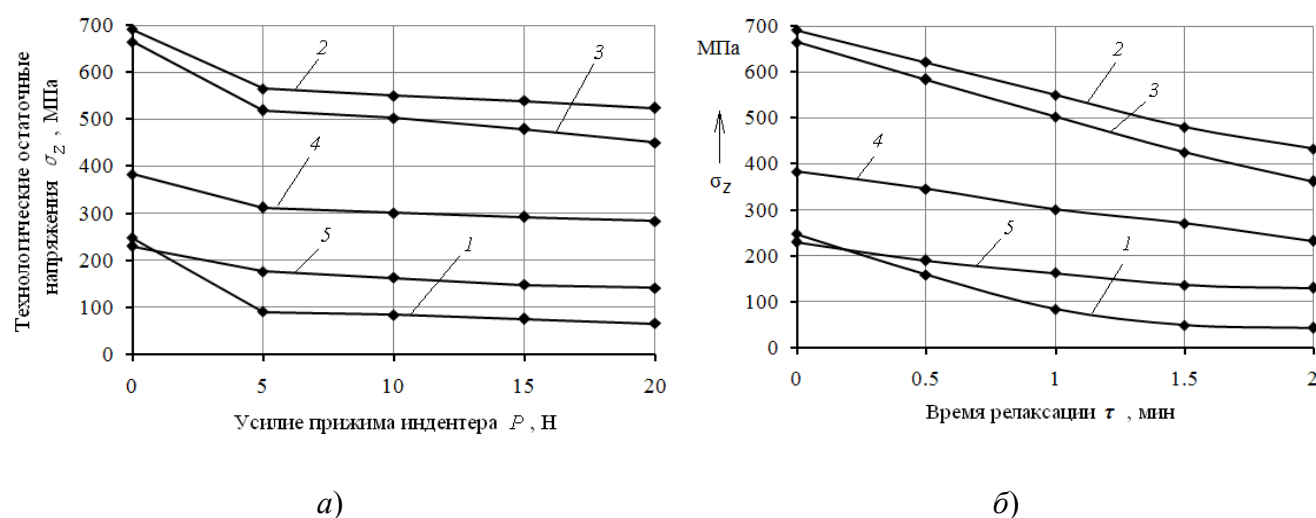


Рис. 3.36. Влияние усилия прижима индентора P (а) и времени τ (б) УЗ релаксации на эффективность снятия ТОН в ПС заготовок из: 1 – 30ХГСА; 2 – 40Х13; 3 – 07Х16Н6; 4 – ВТ9; 5 – ВТ3-1

Кроме того, исследования показали, что увеличение усилия прижима индентора P к заготовке оказывает незначительное влияние на эффективность снятия ТОН по сравнению с увеличением времени релаксации τ . Это можно объяснить несущественным изменением площади пятна контакта индентора с заготовкой при небольшом увеличении усилия прижима (порядка 10 – 20 Н).

3.6. ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И КОЭФФИЦИЕНТА НАСЛЕДОВАНИЯ

Для проверки адекватности итоговых моделей реальным значениям ТОН и коэффициента наследования находили дисперсию адекватности [114]:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{m}{N-1} \cdot \sum_{\gamma=1}^N (\bar{y}_{\gamma} - \hat{y}_{\gamma})^2, \quad (3.5)$$

где m – число параллельных наблюдений при проведении опыта; N – общее число опытов; $\bar{y}_{\gamma}$ – среднее арифметическое по m наблюдениям в произвольный момент времени; $\hat{y}_{\gamma}$ – математическое ожидание параметра оптимизации (расчетное значение параметра в произвольный момент времени).

Адекватность зависимостей проверяли по критерию Фишера:

$$F_p = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{д}}^2}, \quad (3.6)$$

где $S_{\text{д}}^2$ – дисперсия параметра оптимизации:

$$S_{\text{д}}^2 = \frac{1}{m-1} \sum_1^m (x_i - \bar{x})^2. \quad (3.7)$$

Проверку гипотезы адекватности проводили, задавая уровень значимости $q = 5 \%$ и определяя число степеней свободы:

$$f_1 = N - 1; f_2 = N \cdot (n_0 - 1). \quad (3.8)$$

По справочным данным [114] определяли табличное значение критерия Фишера F_T для определенного выше соотношения числа степеней свободы.

Гипотеза адекватности итоговой зависимости реальному процессу принимается, если расчетное значение критерия F_p , определенное по зависимости (3.6), будет меньше табличного значения F_T :

$$F_p \leq F_T. \quad (3.9)$$

Представленные в параграфе 2.1 математические модели (2.15) и (2.16) для расчета остаточных напряжений с учетом технологического наследования были использованы при численном расчете ТОН, зависящих от теплосилового фактора ($\sigma_{ТС}$ на рис. 3.37), остаточных напряжений после шлифования (σ_z на рис. 3.37) и коэффициента наследования (K_H на рис. 3.38) на примере обработки заготовок из высокопрочной стали 30ХГСА.

Комбинированную обработку и врезное шлифование образцов проводили при условиях, описанных в параграфе 3.1. Элементы режима комбинированной обработки точением и УЗТВ: глубина резания $t = 0,75$ мм; окружная скорость заготовки $V_3 = 44$ м/мин; подача $S = 0,054$ мм/об; усилие прижима индентора $P = 200$ Н. Элементы режима последующего круглого наружного шлифования: припуск $Z_{шл} = 0,1$ мм; окружная скорость заготовки $V_3 = 30$ м/мин; окружная скорость круга $V_{кр} = 35$ м/с.

Контактную температуру в зоне шлифования (760°C) определяли методом полуискусственной термопары.

На рис. 3.37 представлены сравнительные результаты расчета ТОН в ПС шлифованных заготовок из стали 30ХГСА с учетом технологического наследования.

Наиболее близкое значение расчетного критерия Фишера к табличному (расчетное значение равно 4,38, табличное – 4,46) отмечено при расчете эпюры остаточных напряжений по предлагаемой во второй главе методике.

Как следует из рис. 3.38, расхождение результатов численного расчета коэффициента наследования K_H и его экспериментального определения в лабораторных условиях не превышает 11 %. Удовлетворительное согласование результатов свидетельствует об адекватности разработанных математических зависимостей

реальным условиям обработки и о возможности использования этих зависимостей для прогнозирования величины ТОН и коэффициента наследования.

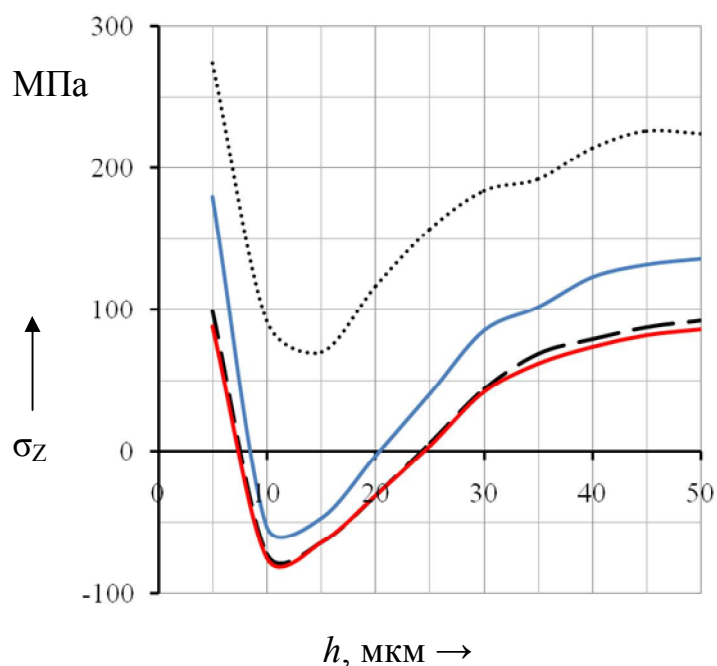


Рис. 3.37. Эпюры ТОН в поверхностном слое заготовок из высокопрочной стали 30ХГСА после шлифования: - - - - экспериментальные данные; — — — расчет по методике А.М. Дальского; — — — расчет по предлагаемой методике; - расчетные ТОН от теплосилового воздействия

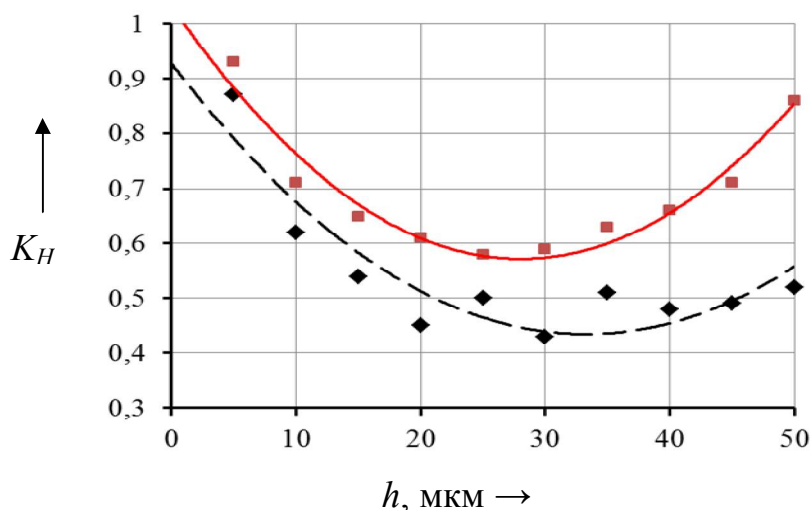


Рис. 3.38. Коэффициент наследования ТОН в ПС заготовок из стали 30ХГСА: - - - - экспериментальные данные; — — — расчет по предлагаемой методике

3.7. ВЫВОДЫ

Результаты экспериментальных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1) Для всех исследуемых материалов установлено влияние параметров качества поверхностного слоя (технологических остаточных напряжений и фазового состава для 07X16H6, BT9 и BT3-1), сформировавшихся в ходе предварительной комбинированной обработки точением и УЗТВ, на соответствующие параметры качества ПС заготовок после последующего шлифования, что говорит о влиянии технологического наследования на эти параметры даже при снятии достаточно больших (до 0,1 мм) припусков.

2) Подтверждено экспериментально выдвинутое во второй главе представленной диссертации предположение о влиянии тепловой напряженности в зоне контакта инструмента с заготовкой и свойств исследуемого материала на изменение величины коэффициента наследования ТОН по глубине ПС обработанных образцов. Анализ результатов показал, что наибольший коэффициент наследования K_H был зафиксирован в ходе обработки заготовок из коррозионно-стойкой стали 40X13, следовательно, влияние сформированных на предварительной операции ТОН, в заготовках из данной марки стали максимально среди всех исследуемых сталей и сплавов.

3) Использование комбинированной обработки точением и ультразвуковым твердосплавным выглаживанием полосовым индентором на предварительных операциях ТП является эффективным способом формирования качества поверхностного слоя заготовок из титановых сплавов (ФС и ТОН). Однако, разные элементы режима обработки неоднозначно влияют на соотношение объемов фаз разных по химическому составу сплавов. Поэтому к их назначению следует подходить с учётом заданных технических требований, стремясь обеспечить не только требуемый уровень остаточных напряжений и фазовый состав поверхностного слоя, но и максимально возможную производительность обработки. Как показали результаты исследований, представленные в данной работе, наибольшие резервы

для этой цели открываются при варьировании глубиной резания t и усилием прижима твердосплавного выглаживателя P .

4) Доказана эффективность использования УЗ-релаксации полосовым индентором для атермического снятия остаточных напряжений. Увеличение времени релаксации T приводит к существенному снижению уровня растягивающих ТОН в ПС шлифованных заготовок из всех исследуемых труднообрабатываемых материалов. Скорость релаксации в стальных заготовках составила 140-160 МПа/мин; в заготовках из титановых сплавов – 70-80 МПа/мин. Увеличение усилия прижима индентора P приводит к возрастанию площади пятна контакта инструмента с заготовкой (как показано в главе 2), а, следовательно, к увеличению времени «озвучивания» ПС заготовки. Однако, вследствие малых значений усилия прижима индентора, эффективность УЗ-релаксации возрастает незначительно (8-10%).

ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАПРАВЛЕННОМУ ФОРМИРОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК И УЛЬТРАЗВУКОВОЙ РЕЛАКСАЦИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

4.1.1. Основные положения разрабатываемых технологических рекомендаций

Представленные технологические рекомендации предназначены для использования при разработке и выполнении операций комбинированной обработки заготовок точением и ультразвуковым твердосплавным выглаживанием и ультразвуковой релаксации технологических остаточных напряжений, возникающих в ПСзаготовок из труднообрабатываемых материалов в процессе их обработки. Они содержат данные по выбору материала индентора, состава и способа подвода СОТС и режимов обработки.

Рекомендуемые условия и режимы комбинированной обработки (точением и УЗТВ) и УЗ-релаксации применимы для обработки заготовок изодно- и двухфазных сталей или титановых сплавов ($\alpha+\beta$)-класса, если последние по своему химическому составу и технологическим свойствам окажутся близкими к одному из приведенных в табл.4.1 обрабатываемых материалов (принадлежащим к одной группе обрабатываемости).

Технологические рекомендации разработаны на основе обобщения результатов аналитических и экспериментальных исследований, проведенных на кафедре «Технология машиностроения» Ульяновского государственного технического университета и представленных в главе 3 настоящей диссертации.

Основные положения, учитывавшиеся при разработке технологических рекомендаций по направленному формированию заданных параметров качества ПС, включают в себя следующее:

1. При обеспечении заданных требований к точности размеров, геометрической формы и шероховатости обработанной поверхности детали под качеством выполнения комбинированной обработки точением и УЗТВ и УЗ-релаксации понимается получение в ПС максимальных сжимающих остаточных напряжений или минимизация ТОН любого знака по абсолютной величине (для предотвращения коробления маложестких и тонкостенных заготовок).

4.1. Группы обрабатываемости различных марок материалов

Группа обрабатываемости	Группа по ISO 513	Обрабатываемый материал	Типовой представитель
1	P	Конструкционная легированная сталь	30ХГСА
2	M	Коррозионно-стойкая однофазная сталь	40X13
3		Коррозионно-стойкая двухфазная сталь	07X16H6
6	S	Титановые сплавы ($\alpha+\beta$)-класса	BT9, BT3-1

2. Появление нежелательных растягивающих остаточных напряжений связано, главным образом, с процессом избыточного теплообразования в зоне контакта режущего инструмента с заготовкой. При этом высоколегированные стали (высокопрочные, коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные) и титановые сплавы отличаются низкой теплопроводностью, что повышает вероятность образования растягивающих ТОНв ПС заготовок из таких материалов.

3. Следует учитывать влияние ряда технологических факторов на процесс формирования остаточных напряжений:

а) при комбинированной обработке точением и УЗТВ:

- увеличение усилия прижима индентора до определенных значений ведет к росту сжимающих напряжений в ПС заготовки, распаду остаточного аустенита в

двухфазных сталях (переход $\gamma \rightarrow \alpha$) и обратному ($\beta \rightarrow \alpha$)-переходу в титановых сплавах. Избыточное (сверхнормативное) увеличение усилия прижима индентора может привести к разупрочнению поверхностного слоя вследствие перенаклепа;

- увеличение окружной скорости заготовки, глубины резания и подачи на этапе точения и окружной скорости заготовки и подачи на этапе УЗТВ приводит к неоднозначному изменению параметров качества ПС, так как при этом увеличиваются контактные температуры, что способствует формированию растягивающих ТОН и фазовым переходам. Возрастание силового воздействия на ПС провоцирует процессы распада остаточного аустенита и обратного ($\beta \rightarrow \alpha$)-перехода, а также способствует увеличению количества дислокаций и упрочнению ПС.

б) при ультразвуковой релаксации:

- увеличение усилия прижима индентора приводит к увеличению эффективности релаксации ТОН в ПС заготовки;

- увеличение времени процесса УЗР вызывает существенное увеличение эффективности снятия ТОН, однако, процесс снятия остаточных напряжений прекращается при достижении определенного времени насыщения.

4. Операция комбинированной обработки точением и УЗТВ должна обеспечивать максимальные по величине и глубине залегания сжимающие остаточные напряжения (или же минимальные растягивающие), а операция УЗР – минимальные по абсолютной величине ТОН независимо от их знака. Для гарантированного обеспечения заданных параметров качества ПС деталей необходимо обеспечить требуемую жесткость и виброустойчивость оборудования.

5. Контроль ТОН рекомендуется производить, в частности, с помощью приборов для неразрушающего контроля типа «Ситон-АРМ», «Рикор-4» или их аналогов. Соотношение объемов фаз α - и γ -железа, а также α - и β -титана предпочтительнее определять с использованием современных неразрушающих рентгеновских измерительных комплексов (например, «Рикор-7»). Методика измерения указанных параметров качества ПС на подобных приборах приведена в главе 3 диссертации.

4.1.2. Выбор индентора

1. Выбор характеристик твердосплавного индентора для операции комбинированной обработки точением и УЗТВ и ультразвуковой релаксации следует производить с использованием рекомендаций и каталогов фирм-производителей сменных многогранных пластин из современных твердых сплавов.

2. Состав покрытия твердого сплава следует выбирать по каталогам фирм-изготовителей в соответствии с материалом обрабатываемой заготовки. Материалы пластин резца и индентора для каждой из рассмотренных групп материалов приведены в табл. 3.5. В качестве деформирующего инструмента рекомендуется использовать сменные многогранные пластины KorloyCNMG 120408-HS из твердого сплава марки NC3010, предназначенного для обработки легированных углеродистых сталей, NC9025 – для коррозионно-стойких сталей и NC8010 – для титановых сплавов(табл. 4.2)или их аналоги.

4.2. Материалы твердосплавных инденторов для ультразвуковой обработки

Группа обрабатываемости	Марка материала заготовки	Фирма-производитель пластин	Марка твердого сплава индентора
1	30ХГСА	KORLOY Inc., Южная Корея	NC3010, NC330
		Sandvik Coromant, Швеция	4325
		Mitsubishi Materials, Япония	UE6020, UE6105
2, 3	40X13, 07X16H6	KORLOY Inc., Южная Корея	NC330, NC9025
		Sandvik Coromant, Швеция	2025
		Mitsubishi Materials, Япония	US7020, MC7025
6	BT9, BT3-1	KORLOY Inc., Южная Корея	NC8010
		Sandvik Coromant, Швеция	1115
		Mitsubishi Materials, Япония	US905, MP9015

3. Предпочтительным является использование пластины квадратной или ромбической формы с передним углом $\gamma = 0^\circ$. В противном случае, усложнится настройка выглаживателя относительно продольной оси заготовки и изменится режим её контакта с индентором.

4.1.3. Выбор смазочно-охлаждающего технологического средства

1. Выбор состава СОТС и его концентрацию следует проводить исходя из необходимости реализации прежде всего смазочного действия. Это особенно важно при комбинированной обработке заготовок точением и УЗТВ или УЗР. При выборе водорастворимых СОТС следует учитывать состав их концентратов и физико-механические характеристики инструментального и обрабатываемого материалов, а также качество воды на предприятии и её основные характеристики.

2. На этапах УЗР следует использовать 100%-ные концентраты водорастворимых полусинтетических СОТС (на примере представленного в исследованиях полусинтетического СОТС «Велс-1») с расходом 5 г/час. Способ нанесения на контактирующие объекты – кистью. В качестве СОТС при точении (на этапе комбинированной обработки) рекомендуется использовать 3%-ный раствор той же СОТС «Велс-1», подававшейся в зону контакта инструмента с заготовкой свободно-падающей струей с расходом $10 \text{ дм}^3/\text{мин}$.

3. В качестве аналогов применяемой СОТС предлагается использовать отечественные полусинтетические СОТС «Велс-1М», «Карбомол», «ВИОЛ», «Укринол-1М», «Акватек Плюс», синтетические «Техмол» и «Техмол-Экстра», а также другие их отечественные и зарубежные аналоги, сходные по физическо-химическим свойствам и функциональным действиям [76].

4. В процессе обработки следует осуществлять тщательную очистку СОТС от механических примесей и осуществлять периодический контроль их эксплуатационных свойств в соответствии с рекомендациями [76].

4.1.4. Порядок назначения элементов режима обработки

Для определения рациональных элементов режима комбинированной обработки точением и УЗТВ или УЗ-релаксации необходимо использовать схему, представленную на рис. 4.1. Для этого необходимо ориентировочно определить предел выносливости (усталостную прочность) для обрабатываемой заготовки из типовых представителей рассматриваемых материалов, используя зависимости (1.1)-(1.3) из первой главы диссертации.

Далее следует определить эксплуатационные циклические нагрузки (исходя из условий работы детали). Именно этими нагрузками ограничиваются максимально допустимые ТОН в ПС обработанных деталей.

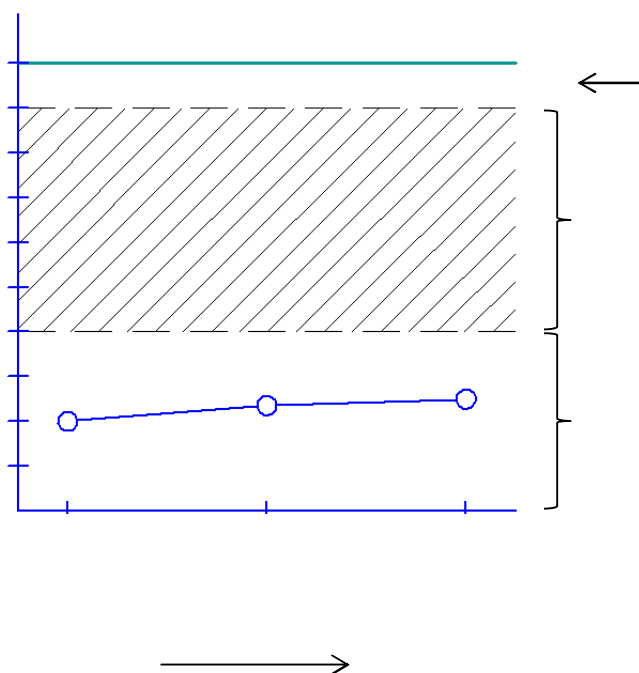


Рис. 4.1. Схема для определения рациональных элементов режима ультразвуковой обработки по критерию максимально допустимых ТОН в ПС обработанных заготовок

При определении реального предела выносливости (усталостной прочности) с учетом ТОН, последние будут не в полной мере оказывать влияние на σ_1 . Поэтому необходимо учитывать их с некоторым коэффициентом запаса K_3 (для различных металлов и сплавов составляет $K_3 \approx 0,5 \dots 0,9$) [63].

Выбор элементов режима *комбинированной обработки точением и УЗТВ* производят по методике, изложенной выше, с использованием графических зависимостей, представленным на рис. 4.2 и 4.3.

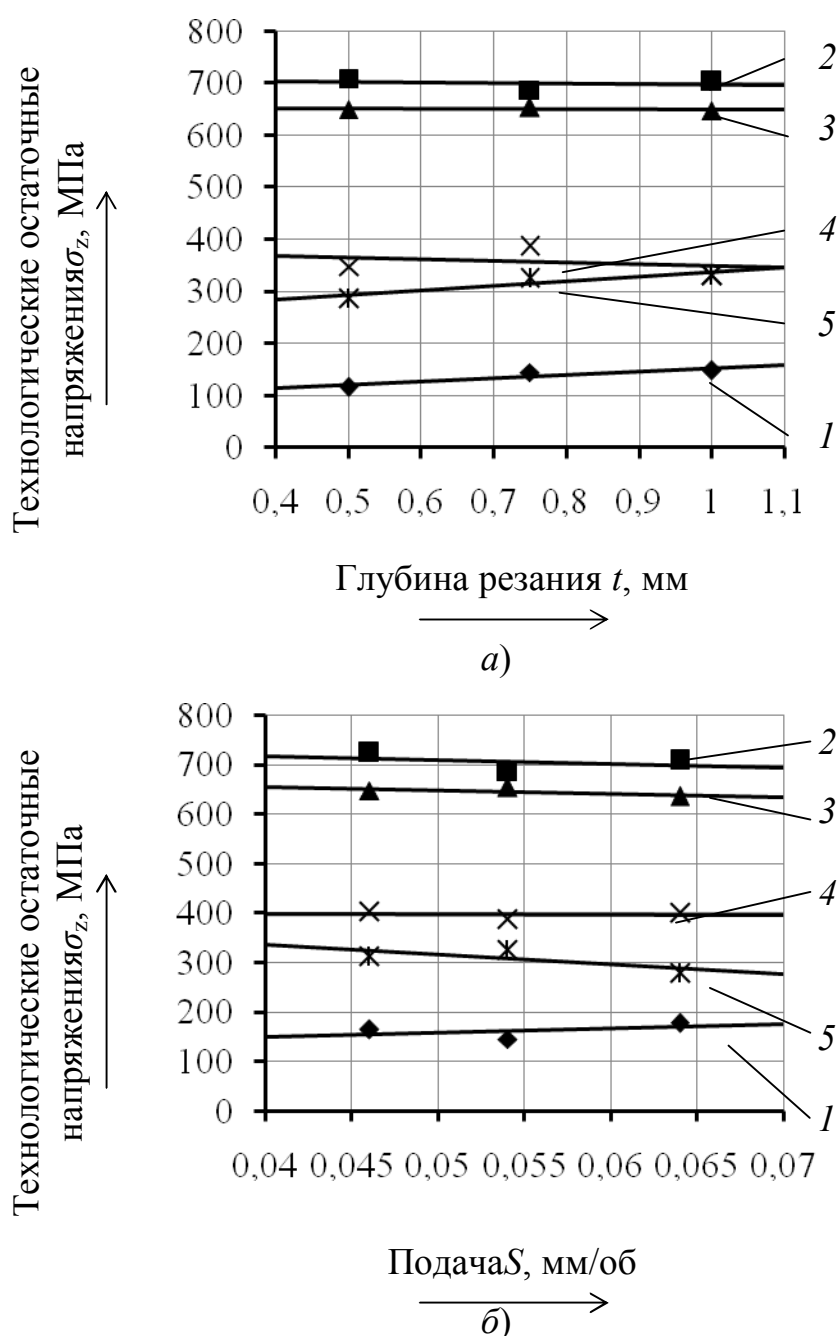


Рис. 4.2. Влияние глубины резания t (а) и подачи S (б) на этапе предварительной комбинированной обработки точением и УЗТВ на величину ТОН в ПС шлифованной заготовки: 1 – 30ХГСА; 2 – 40Х13; 3 – 07Х16Н6; 4 – ВТ3-1; 5 – ВТ9

Зависимости получены на основе обобщения результатов экспериментальных данных третьей главы и аналитических исследований главы 2 (зависимости 2.15 – 2.16).

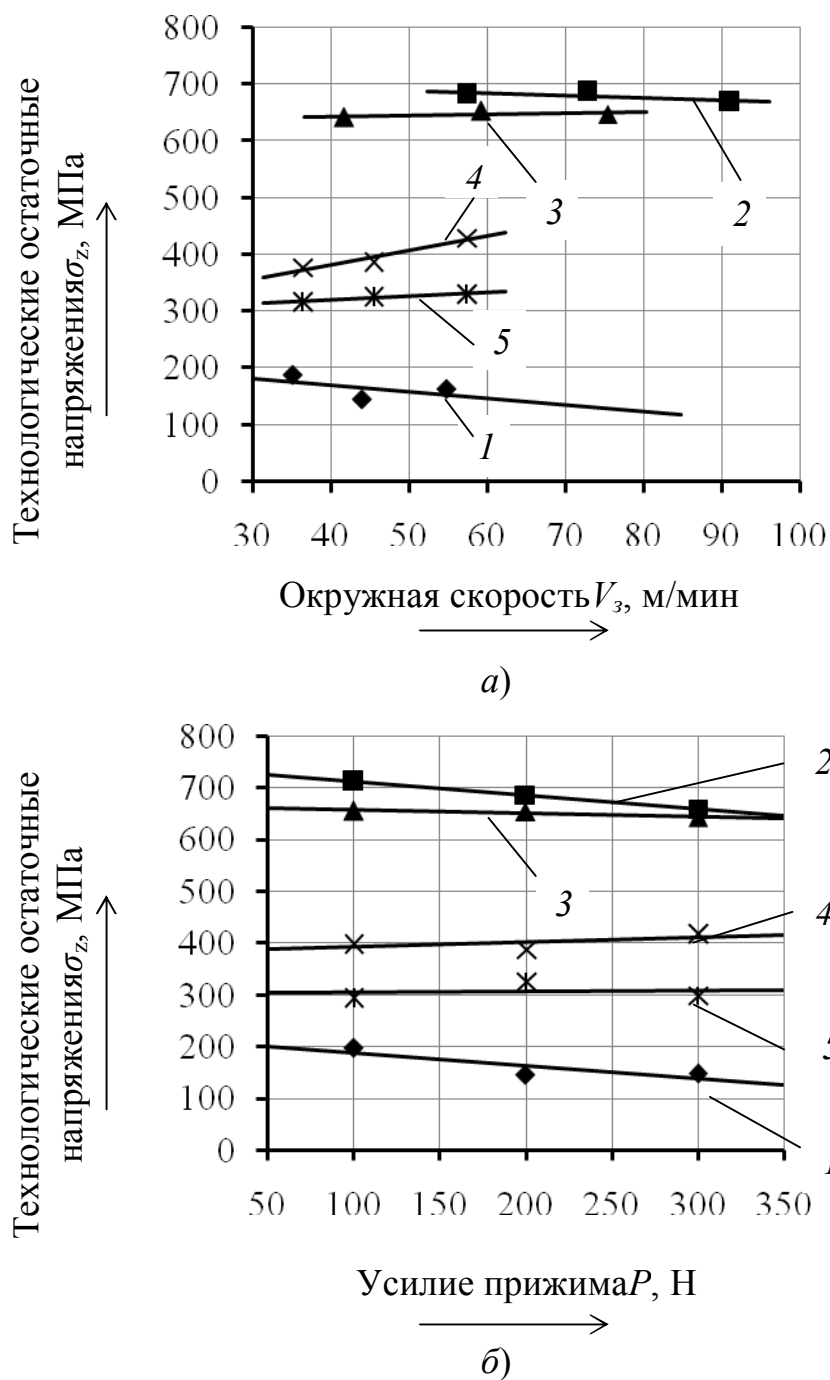


Рис. 4.3. Влияние окружной скорости заготовки V_3 (а) и усилия прижима P (б) на этапе предварительной комбинированной обработки точением и УЗТВ на величину ТОН в ПС шлифованной заготовки: обозначения – см. рис. 4.2

В качестве типового для последующей обработки после комбинированного точения, а также перед УЗ-релаксацией принят цикл врезного шлифования, режимы которого для каждого из типовых представителей рассматриваемых материалов приведены в табл. 3.6.

После определения глубины резания t , окружной скорости заготовки V_3 , выбор частоты вращения заготовки необходимо производить исходя из технических возможностей используемого станка.

Выбор элементов режима *ультразвуковой релаксации* производят с учетом максимальной эффективности релаксации.

Изменение усилия прижима P не оказывает существенного влияния на эффективность релаксации полосовым индентором и определяется для каждого типового представителя обрабатываемых материалов исходя из его механических характеристик как максимально допустимое усилие, не приводящее к началу пластической деформации ПС (т.к. УЗ-релаксация происходит в зоне упругой деформации). В ходе экспериментальных исследований наибольшая величина усилия P составляла 20 Н для всех обрабатываемых материалов. Прикладываемое к индентору усилие не должно приводить к деформированию формы тонкостенных или мало жестких заготовок.

Выбор времени релаксации следует выбирать наибольшим, однако следует учитывать такт выпуска заготовок и явление «насыщения», при котором УЗ-релаксация прекращается.

Для сталей 40Х13, 07Х16Н6 и титанового сплава ВТ9 время насыщения составляет ≈ 2 мин. Для стали 30ХГСА и титанового сплава ВТ3-1 – около 1,5 мин.

Для увеличения эффективности УЗ воздействия при механической обработке и УЗ-релаксации следует использовать генераторы, позволяющие создавать колебания, модулированные по амплитуде и частоте, например, «Техма-2», УЗР-621АМ или аналогичные им по характеристикам [32].

4.1.5. Требования безопасности

1. При работе с СОТС (в частности, с жидкими СОЖ) необходимо соблюдать меры предосторожности, изложенные в ТУ на СОТС и в Инструкции Минздрава России «О мероприятиях при работе с охлаждающими маслами и жидкостями», в Инструкции «Гигиенические мероприятия при применении СОЖ для механической обработки металлов резанием», в «Инструкции по профилактике кожных заболеваний при работе с СОЖ».

2. Рабочие, привлекаемые к выполнению операций с применением СОТС подлежат обязательному предварительному, а затем регулярному медицинскому осмотру не реже одного раза в год.

3. При работе с СОТС следует учитывать возможность воздействия вредных и опасных факторов при разбрызгивании СОТС, включая химические факторы, возникающие вследствие разложения СОТС и взаимодействия ее с материалами обрабатываемых заготовок под влиянием высоких температур; биологических факторов.

4. При работе с источниками ультразвука необходимо соблюдать санитарные нормы и правила, изложенные в СанПиН 2.2.4./2.1.8.582-96.

В целях исключения указанных факторов необходимо:

- ограждать зону обработки станков защитными экранами в соответствии с ГОСТ 12.2009-80;

- предусмотреть местную вытяжную вентиляцию (ГОСТ 12.2009-80) (в случае, если вентиляция не предусмотрена в конструкции используемого оборудования);

- для защиты кожного покрова от воздействия СОЖ следует использовать дерматологические защитные средства (пасты, мази, биологические перчатки) по ГОСТ 12.4.068-79;

- применять дистанционное управление источниками ультразвука; если это невозможно, то необходимо использовать приспособления для их удержания или оснащать рабочих перчатками и рукавицами;

- предусмотреть автоматическое отключение источников ультразвука при выполнении вспомогательных операций;
- ручные ультразвуковые источники должны иметь форму, обеспечивающие минимальное напряжение мышц кисти и верхнего плечевого пояса оператора и соответствовать техническим требованиям эстетики;
- при контактной передаче в холодный и переходный период года работающие должны обеспечиваться теплой спецодеждой по нормам, установленным в данной климатической зоне или производстве.

4.1.6. Типовая последовательность выполнения технологических операций

Исходя из результатов проведенных аналитических и экспериментальных исследований (см. глава 2 и 3) можно составить две основные типовые последовательности выполнения технологических операций.

Первая обеспечивает формирование в ПС обрабатываемых заготовок наибольших по величине и глубине залегания сжимающих остаточных напряжений и наименьшее время изготовления, исходя из используемых элементов режима обработки на рассматриваемой операции. Вторая – наименьшие по абсолютной величине ТОН.

УЗ-релаксация как заключительная операция технологического процесса необходима лишь во второй (окончательной) стадии обработки при изготовлении маложестких или тонкостенных деталей, так как в этом случае необходимо снижать абсолютные значения как сжимающих, так и растягивающих остаточных напряжений для предотвращения нарушений формы и изменения угловых размеров готовых деталей.

Обе типовые последовательности обработки заготовок приведены в табл. 4.3. Приведенные типовые последовательности выполнения технологических операций являются условными.

В каждом конкретном случае следует опираться на технические требования к параметрам качества деталей, указанным на чертеже. Однако, данные технологи-

ческие процессы можно использовать при разработке новых ТП обработки заготовок типа тел вращения из труднообрабатываемых материалов, склонных к возникновению ТОН в ПС из-за теплосиловой напряженности процесса удаления припуска.

4.3. Типовые последовательности выполнения технологических операций

№ оп	Типовая последовательность №1	Типовая последовательность №2
1	Комбинированная точение и УЗТВ	Точение
2	Шлифование	Шлифование
3	-	УЗ-релаксация

4.2. ИСТОЧНИКИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И РАСЧЕТ ОЖИДАЕМОГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Экономическая эффективность обеспечения качества поверхностного слоя деталей из труднообрабатываемых материалов с учетом технологического наследования определяется в сравнении одного из приведенных в п.4.1.5 техпроцессов с часто применяемым в условиях действующего производства. Последний, как правило, включает помимо точения и шлифования еще и «термическую» релаксацию ТОН. Анализ представленных в настоящей главе результатов технологической эффективности показывает, что основными источниками экономической эффективности этих устройств являются:

1) Повышение производительности за счёт сокращения машинного времени при неизменном качестве деталей.

2) Существенное повышение качества обработанных деталей и улучшение их эксплуатационных характеристик при сохранении заданной производительности изготовления деталей.

3) Повышение производительности и качества обработанных деталей одновременно.

Расчет экономической эффективности от использования технологического наследования ТОН и УЗ-релаксации с полосовым контактом с заготовкой выполнен в соответствии с методикой определения эффективности использования новой техники [16].

Экономический эффект от внедрения новой техники определяется по формуле [16]:

$$\mathcal{E} = (C_1 + K_1 \cdot E_H) \cdot P_1 - (C_2 + K_2 \cdot E_H) \cdot P_2, \quad (4.1)$$

где C_1, C_2 – себестоимость производства одной детали по базовому варианту и по проекту, руб; K_1, K_2 – капитальные вложения по базовому варианту и по проекту, руб; $E_H = 0,15$ – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений; P_1, P_2 – годовая программа выпуска по базовому варианту и по проекту, шт.

Выполненный анализ научно-технической литературы и действующего машиностроительного производства ряда отечественных промышленных предприятий (ЗАО «Авиастар-СП», АО «Ульяновский механический завод», ОАО «НПО «Сатурн» и др.) показывает, что для снятия растягивающих ТОН наибольшее применение нашли способы, основанные на термическом воздействии на заготовку или естественного старения. В связи с этим, себестоимость операции релаксации для одной заготовки в общем виде определяем из зависимости [89]:

$$C = \frac{Z_{\text{экс}} \cdot T_{\text{шт}}}{F_{\text{до}} \cdot 60} \quad (4.2)$$

где $Z_{\text{экс}}$ – годовые эксплуатационные расходы, руб; $T_{\text{шт}}$ – штучное время изготовления одной детали, мин; $F_{\text{до}} = 4015$ – действительный годовой фонд работы оборудования, ч.

В табл. 4.4 приведены все данные, необходимые для расчета экономической эффективности комбинированной операции шлифованием и выглаживанием.

Для определения годовых эксплуатационных расходов воспользуемся зависимостью [16]

$$Z_{\text{экс}} = Z_a + Z_p + Z_{\text{э}} + Z_u + Z_{\text{зн}} \quad (4.3)$$

где Z_a , Z_p , $Z_э$, Z_u , $Z_{зн}$ – соответственно затраты на амортизацию и ремонт оборудования, электроэнергию, инструмент и заработную плату, включая отчисления на социальное страхование, руб.

Дальнейшие расчеты производим для нахождения слагаемых, входящих в уравнения (4.1) – (4.3).

В качестве объекта для расчета ожидаемого экономического эффекта от внедрения результатов экспериментальных исследований выбран стакан 47601.1351.580.003 (см. рис. 4.4) из высокопрочного титанового сплава BT22 (класс $(\alpha+\beta)$; $\sigma_B = 1080-1270$ МПа; $\sigma_T \approx 950$ МПа), изготавливаемый по номенклатуре 244 и 248 цехов ЗАО «Авиастар-СП». Данная деталь в количестве четырнадцати штук входит в систему управления закрылками перспективного транспортного самолета Ил-76МД-90Е и является ответственной.

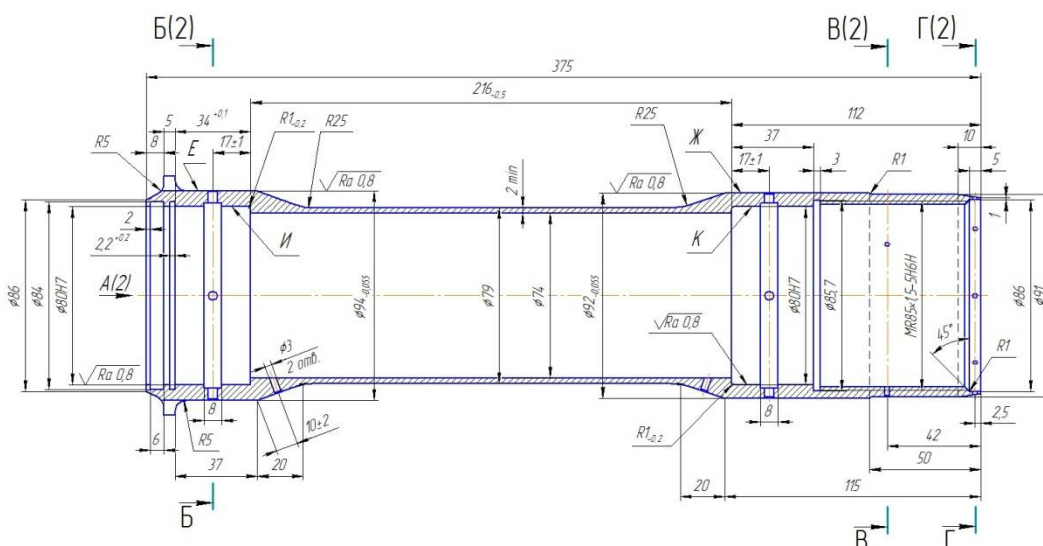


Рис. 4.4. Эскиз стакана 47601.1351.580.003

Толщина стенок стакана является переменной по длине в 372 мм. Её минимальная величина составляет 2 мм, вследствие чего в технологический процесс изготовления стакана для предотвращения деформаций от остаточных напряжений предусмотрено пять операций естественного старения в условиях цеха. Причем каждая такая операция длится не менее двух суток, а в общей сложности старение составляет свыше 90% штучного времени.

Для повышения производительности изготовления стакана предложено исключить операции естественного старения и заменить их ультразвуковой релаксацией полосовым твердосплавным индентором.

Обработка наружных цилиндрических поверхностей в действующем производстве ЗАО «Авиастар-СП» осуществляется на токарно-винторезном станке 1М63БФ101, внутренних – на станке для глубокого сверления Boeringher B-630/2, отверстий – на вертикально-сверлильном станке 2Г125, фигурного фланца – на фрезерном станке с ЧПУ 6725ПФ2, шлифование – на круглошлифовальном станке ВUB-40/2000.

Все исходные данные – цены, коэффициенты, нормы времени и т.п. представлены по состоянию на июль 2014 г.

В зависимостях для расчетов индекс «1» относится к базовому (заводскому) варианту, а индекс «2» - к предлагаемому.

Затраты на амортизацию оборудования [16]:

$$Z_a = C_o \cdot K_m \cdot H_a ; \quad (4.4)$$

$$Z_a^1 = 1800000 \cdot 1,1 \cdot 0,13 = 257400 \text{ руб.};$$

$$Z_a^2 = 1900000 \cdot 1,1 \cdot 0,13 = 271700 \text{ руб.}$$

Ежегодные затраты на ремонт основных производственных фондов [89]:

$$Z_p = C_o \cdot K_m \cdot K_p ; \quad (4.5)$$

$$Z_p^1 = 1800000 \cdot 1,1 \cdot 0,06 = 118800 \text{ руб.};$$

$$Z_p^2 = 1900000 \cdot 1,1 \cdot 0,06 = 125400 \text{ руб.}$$

Годовые затраты на электроэнергию определяются по зависимости [89]:

$$Z_{\varepsilon} = N \cdot F_{\text{до}} \cdot K_n \cdot K_{\text{нз}} \cdot C_{\varepsilon} ; \quad (4.6)$$

$$Z_{\varepsilon}^1 = 45,5 \cdot 4015 \cdot 0,7 \cdot 1,15 \cdot 1,95 = 286765 \text{ руб.};$$

$$Z_{\varepsilon}^2 = 45,7 \cdot 4015 \cdot 0,7 \cdot 1,15 \cdot 1,95 = 288026 \text{ руб.}$$

Годовые затраты на заработную плату с учетом всех начислений и доплат находим, используя зависимость [16]:

$$Z_{\text{зн}} = C_{\text{ст}} \cdot F_{\text{до}} \cdot K_{\text{нр}} \cdot K_{\text{дон}} \cdot K_{\text{нз}} ; \quad (4.7)$$

$$3_{3n}^1 = 3_{3n}^2 = 120 \cdot 4015 \cdot 1,4 \cdot 1,1 \cdot 1,296 = 961590 \text{ руб.}$$

**4.4. Исходные данные для расчета экономической эффективности
(по результатам обследования действующего производства ЗАО «Авиастар-СП» и результатам исследований в УлГТУ)**

Показатели	Обозначение, единица измерения	Значение по технологии	
		базовой	новой
Затраты на НИОКР	$З_{\text{НИОКР}}$, руб	—	50000
Норма штучного времени: – обработки; – релаксации	$t_{\text{шт}}$, мин	180 14 400	180 10
Цена оборудования	$Ц_o$, руб	1 800000	1 900000
Мощность: – устройство для УЗ-обработки; – станочное оборудование	N , кВт	— 45,5	0,2 45,5
Затраты на ремонт основных производственных фондов	K_p , %	6	6
Стоимость электроэнергии	$Ц_{\text{э}}$, руб/кВт·ч	1,95	1,95
Годовой действительный фонд работы оборудования	$F_{\text{до}}$, ч	4015	4015
Часовая тарифная ставка рабочего	$Ч_{\text{ст}}$, руб/час	120	120
Стоимость инструмента и оснастки	$Ц_{\text{и}}$, руб	2000	4000
Коэффициент использования мощности	K_n	0,7	0,7
Коэффициент потерь электроэнергии в сети	$K_{\text{нэ}}$	0,15	0,15
Затраты на монтаж и доставку	K_m , %	10	10
Норма амортизации	H_a , %	13	13
Доплата по премиям	$K_{\text{пр}}$, %	40	40
Дополнительная заработная плата	$K_{\text{доп}}$, %	10	10
Начисления на заработную плату	$K_{\text{нз}}$, %	29,6	29,6
Допустимые потери времени на переналадку	K_n , %	5	5

Таким образом, с учетом проведенных вычислений получим сумму эксплуатационных расходов за один год:

$$З_{\text{экс}}^1 = 257400 + 118800 + 286765 + 2000 + 961590 = 1626555 \text{ руб.};$$

$$З_{\text{экс}}^2 = 271700 + 125400 + 288026 + 4000 + 961590 = 1650716 \text{ руб.}$$

Согласно заводским данным, годовая программа выпуска стаканов составляет 84 шт. Себестоимость обработки всех деталей за год согласно зависимости (4.2) составит:

$$C_1^r = \frac{1626555 \cdot 29520}{4015 \cdot 60} = 199319 \text{ руб.};$$

$$C_2^r = \frac{1650716 \cdot 15960}{4015 \cdot 60} = 109363 \text{ руб.}$$

Себестоимость обработки одной детали будет равна, соответственно, $C_1 = 2373$ руб. и $C_2 = 1302$ руб. Далее рассчитываем капитальные затраты на одну деталь [16]:

$$K = \frac{K_{\text{час}} \cdot t_{\text{шт}}}{60}, \quad (4.8)$$

где $K_{\text{час}} = \frac{Ц_o \cdot K_m}{F_{\text{до}}}$ – капитальные затраты на один час работы, руб.

$$K_{\text{час}}^1 = \frac{1800000 \cdot 1,1}{4015} = 493 \text{ руб.};$$

$$K_{\text{час}}^2 = \frac{1900000 \cdot 1,1}{4015} = 520 \text{ руб.}$$

Таким образом, капитальные затраты на выполнение годовой программы составят:

$$K_1^r = \frac{493 \cdot 29520}{60} = 242556 \text{ руб.};$$

$$K_2^r = \frac{520 \cdot 15960}{60} = 138320 \text{ руб.}$$

Соответственно, капитальные затраты на одну деталь будут равны $K_1 = 2888$ руб. и $K_2 = 1647$ руб. Рассчитываем годовой экономический эффект:

$$\mathcal{E} = (2373 + 2888 \cdot 0,15) \cdot 84 - (1302 + 1647 \cdot 0,15) \cdot 84 = 105600 \text{ руб.}$$

С учетом затрат на НИОКР полный экономический эффект определяется зависимостью [16]:

$$\mathcal{E}_{полн} = \mathcal{E} - Z_{НИОКР} \cdot E_H; \quad (4.9)$$

$$\mathcal{E}_{полн} = 105600 - 50000 \cdot 0,15 = 98100 \text{ руб.}$$

В таблицу 4.5 сведены результаты экономического расчета от внедрения новой техники и технологии в производственный процесс в экономических условиях настоящего времени. Очевидно, разработанная нами технология и техника будет востребована на машиностроительных предприятиях области и страны, принося высокий экономический эффект.

4.5. Результаты экономического эффекта от внедрения в ТП новой техники

Вариант ТП	Эксплуатационные расходы за 1 год, руб	Себестоимость обработки одной детали, руб	Капитальные затраты на одну деталь, руб	Годовая программа выпуска деталей, шт
Базовый вариант	1 626555	2373	2888	84
Новый вариант	1 650716	1 302	1 647	84

4.3. ВЫВОДЫ. СВЕДЕНИЯ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материал данной главы содержит в себе разработанные технологические рекомендации по направленному формированию параметров качества ПС обрабатываемых заготовок из труднообрабатываемых материалов. При разработке типовых последовательностей выполнения технологических операций основное внимание было уделено учету технологического наследования и использованию энергии ультразвука.

Выполненный расчет ожидаемого экономического эффекта и технико-экономической эффективности предлагаемого для внедрения ТП показал его вы-

сокую потенциальную рентабельность в случае внедрения в действующем производстве ЗАО «Авиастар-СП». Полный расчетный годовой экономический эффект с учетом затрат на НИОКР составил свыше 98 тыс. руб. Результаты экономического расчета, а также разработанные технологические рекомендации переданы ЗАО «Авиастар-СП» для внедрения в производство (обработка высокопрочных сталей и титановых сплавов).

Представленные в данной главе технологические рекомендации были направлены также на АО «Ульяновский механический завод» для изучения возможностей внедрения результатов диссертационных исследований при обработке тонкостенных заготовок из труднообрабатываемых материалов (в частности, высокопрочных и коррозионно-стойких сталей).

На основе выполненных исследований и представленных технологических рекомендаций были разработаны и внедрены в учебный процесс машиностроительного факультета ФГБОУ ВПО «Ульяновский государственный технический университет» три практические работы, включенные в рукопись учебного пособия «Современные проблемы науки и производства в машиностроении. Практические занятия по дисциплине»:

1. «Расчётное определение остаточных напряжений в поверхностном слое заготовки при механической обработке»;
2. «Исследование поверхностного слоя деталей машин неразрушающими методами рентгеновского структурно-фазового анализа»;
3. «Исследование технологического наследования при механической обработке».

Результаты внедрения подтверждены соответствующими актами (см. приложения).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных в диссертационной работе теоретико-экспериментальных исследований получены следующие научные выводы и практические результаты:

1) Установлены новые пути решения актуальной научной проблемы повышения эффективности механической обработки заготовок из труднообрабатываемых сталей и сплавов путем рационального применения энергии ультразвукового поля на основе использования явления технологической наследственности.

2) Разработана новая методика оценки технологической наследственности остаточных напряжений в поверхностном слое заготовок, учитывающая раздельное влияние наследственного фактора и теплосиловой напряженности на окончательной операции и сформированных в ходе предварительной обработки технологических остаточных напряжений по глубине.

3) Предложена методика определения коэффициента наследования, учитывающая влияние теплосиловой напряженности процесса обработки и физико-механических свойств обрабатываемого материала на эффективность релаксации сформированных в ходе предварительного формообразования технологических остаточных напряжений.

4) Разработаны новые способы обработки, в том числе и комбинированные, для формирования заданного уровня остаточных напряжений и фазового состава поверхностного слоя заготовок с использованием энергии ультразвукового поля (пат. РФ на изобретение № 2423220, 2464153, 2464154, 2464155, 2495741, 2503532).

5) Установлено, что использование комбинированной обработки точением и ультразвуковым твердосплавным выглаживанием на предварительных этапах технологического процесса позволяет формировать достаточно большие по величине сжимающие ТОН на глубине большей, чем величина припуска под последующую окончательную обработку (например, шлифование).

6) Определены коэффициенты наследования для одной операции, величина которых не превышает 1. Это совпадает с прогнозами и некоторыми экспериментальными данными других ученых. Наибольший коэффициент наследования (0,92 на глубине ПС, равной 5 мкм) установлен при обработке заготовок из коррозионно-стойких сталей (2 группа обрабатываемости, типовой представитель – сталь 40Х13). Для высокопрочных сталей он составил 0,78 (1 группа обрабатываемости, типовой представитель – сталь 30ХГСА); для титановых сплавов – 0,71 (6 группа обрабатываемости, типовой представитель – сплав ВТ9).

7) Силовые воздействия, с которыми сопряжена операция комбинированной обработки точением и ультразвуковым твердосплавным выглаживанием, могут оказывать отрицательное влияние на фазовый состав поверхностного слоя заготовок из двухфазных коррозионно-стойких сталей, вызывая в нем распад аустенита. Результаты экспериментальных исследований показали, что подобные фазовые превращения распространяются на глубину, превышающую припуск на последующую обработку и, вследствие явления технологической наследственности, переносятся на готовую деталь. Это необходимо учитывать при выборе элементов режима обработки, в частности, глубины резания.

8) Ультразвуковая релаксация с использованием полосового твердосплавного индентера позволяет эффективно снижать абсолютную величину остаточных напряжений в поверхностном слое заготовок из труднообрабатываемых материалов (до 250 МПа за 1 мин обработки). Наиболее оптимальное усилие прижима индентера длиной $l = 12$ мм, при котором сохраняется максимальная эффективность релаксации и не начинается пластическое деформирование металла, составляет 25 Н (удельное усилие составляет $\approx 2,1$ Н/мм).

Результаты исследований внедрены в учебный процесс подготовки магистрантов ФБГОУ ВПО «Ульяновский государственный технический университет» и переданы для внедрения на АО «Ульяновский механический завод» и ЗАО «Авиастар-СП». Ожидаемое внедрение на последнем позволит уменьшить норму штучного времени при изготовлении тонкостенных деталей из титановых сплавов (на примере стакана из сплава ВТ22) до 70 раз за счет замены операции естест-

венного старения на ультразвуковую релаксацию, что обеспечит экономический эффект от внедрения в действующее производство около 98 тыс. руб (в ценах на июль 2014г.).

Таким образом, использование явления технологической наследственности при проектировании техпроцессов изготовления деталей из труднообрабатываемых материалов, в том числе и с использованием энергии ультразвуковых колебаний, является весьма оправданным и способно существенно повысить качество поверхностного слоя и эксплуатационные характеристики деталей из труднообрабатываемых материалов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров, А.В. Сопротивление материалов: Учеб. для вузов / А.В. Александров, В.Д. Потапов, Б.П. Державин. – М: Высш. Шк., 2003 – 560 с.
2. Безъязычный, В.Ф. Основы технологии машиностроения. – М. Машиностроение, 2013. – 568 с.
3. Безъязычный, В.Ф. Технологические процессы механической и физико-химической обработки в авиадвигателестроении – В.Ф, Безъязычный, М.Л. Кузьменко. – М.: Машиностроение, 2007. – 539 с.
4. Беляев, В.Н. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей при обкатывании / Инновации в машиностроении – основа технологического развития России: материалы международной НТК. – Барнаул: АлтГТУ, 2014. – С. 59-61.
5. Бергман, Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. – М.: Иностранная литература, 1957. – 728 с.
6. Блюменштейн, В.Ю. Механика поверхностного слоя при обработке размерным совмещенным обкатыванием / В.Ю. Блюменштейн, М.С. Махалов. – Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 2. – С. 18-26.
7. Блюменштейн, В.Ю. Наследственные взаимосвязи механического состояния поверхностного слоя на стадии циклической долговечности с режимами упрочняющей обработки размерным совмещенным обкатыванием / В.Ю. Блюменштейн, М.С. Махалов. – Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. – № 4. – С. 6-14.
8. Блюменштейн, В.Ю. Структурные модели технологического наследования. – Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – № 1. – С. 23-31.
9. Борздыка, А.М. Релаксация напряжений в металлах и сплавах / А.М. Борздыка, Л.Б. Гецов. – М.: Машиностроение, 1978. – 256 с.
10. Бровер, А.В. Проявление эффектов локальной пластической деформации в поверхностных слоях стали при обработке концентрированными потоками энергии. – Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 7. – С. 27-31.

11. Вагапов, И.К. Теоретическое и экспериментальное исследование динамики ультразвуковой виброударной системы с промежуточным бойком / И.К. Вагапов, М.М. Ганиев, А.С. Шинкарев // Известия вузов. Машиностроение. 2008. № 5. С. 3–24.
12. Вагапов И.К, Ганиев М.М., Шинкарев А.С. Экспериментальное исследование ударной обработки ультразвуковым инструментом с промежуточным бойком // Известия вузов. Авиационная техника. 2008. № 4. С. 41–44.
13. Васильев, А.С. Направленное формирование свойств изделий машиностроения / А.С. Васильев, А.М. Дальский, Ю.М. Золотаревский и др. – М.: Машиностроение, 2005. – 352 с.
14. Васильев, А.С. Совершенствование методологии технической подготовки производства деталей машин. - Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2013. – № 10. – С. 5-10.
15. Васильев, А.С. Технологическое управление наследованием эксплуатационных показателей качества упрочненных поверхностей / А.С. Васильев, А.И. Кондаков, С.А. Клименко, М.Л. Хейфец, В.А. Гайко – Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – № 1. – С. 32-38.
16. Великанов, К.М. Расчеты экономической эффективности новой техники: справочник. – Л.: Машиностроение, 1990. – 448 с.
17. Витязь, П.А. Проектирование процессов, использующих для упрочняющей обработки конструкционных материалов концентрированные потоки энергии / П.А. Витязь, А.И. Гордиенко, М.Л. Хейфец – Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – № 1. – С. 8-14.
18. Вишняков, Я.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах / Я.Д. Вишняков, В.Д. Пискарев. – М.: Машиностроение, 1982. – 326 с.
19. Воронцов, А.Л. Новая теория резания / А.Л. Воронцов, Н.М. Султан-заде, А.Ю. Альбагичиев // Приложение к журналу: Справочник. Инженерный журнал. – М.: Машиностроение, 2007. – № 9. – 24 с.

20. Гаврилова, Т.М. Контактное трение в зоне деформации при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании. – Вестник машиностроения. – 2008. – № 8. – С. 36-39.
21. Глейзер, Л.А. О сущности процесса круглого шлифования // Вопросы точности в технологии машиностроения. – М.: Станкин, 1959. – С. 5 – 24.
22. Голямина, И.П. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
23. Губанов, В.Ф. Сравнительная оценка качества обработки цилиндрических поверхностей резанием и выглаживанием / В.Ф. Губанов, В.Я. Герасимов. – Технология машиностроения. – 2006. – № 3. – С. 17-18.
24. Губкин, С.И. Пластическая деформация металлов.– Т.1. – М.: Metallurgizdat, 1961. – 376 с.
25. Гуревич, Я.Л. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: Справочник / Я.Л. Гуревич, М.В. Горохов, В.И. Захаров и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 240 с.
26. Евстигнеев, М.И. Технология производства двигателей летательных аппаратов / М.И. Евстигнеев, А.В. Подзей, А.М. Сулима. – М.: Машиностроение, 1982. – 263 с.
27. Камышанченко, Н.В. Исследование релаксационных процессов в аустенитных хромоникелевых сталях после механико-термической обработки / Н.В. Камышанченко, И.Н. Кузьменко, М.Н. Роганин, И.М. Неклюдов. – Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – № 6. – С. 41-43.
28. Качан, А.Я. Основные направления развития прогрессивных технологий и металлорежущих станков с ЧПУ / В.Ф. Качан А.Я., Мозговой, Беликов С.Б. и др. // Вісник двигунобудування, 2007, №2, с. 82-85.
29. Качанов, Л.М. Основы теории пластичности. – М.: Наука, 1969. – 420 с.
30. Киселев, Е.С. Возможности комбинированной обработки в формировании заданного уровня остаточных напряжений в поверхностном слое / Е.С. Киселев, Е.Н. Лексин, С.А. Романов, О.В. Благовский // СТИН. – 2012. – № 2. – С. 25-29.

31. Киселев, Е.С. Использование ультразвука при обработке заготовок шлифованием и алмазным выглаживанием / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов, З.В. Степчева // Упрочняющие технологии и покрытия, 2007. - №8. – с.43-53.
32. Киселев, Е.С. Механическая обработка заготовок в условиях критического тепломассопереноса. Избранные труды Российской школы по проблемам науки и технологий / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов. – М.: РАН, 2008. – 250с.
33. Киселев, Е.С. Направленное формирование остаточных напряжений путем использования технологических возможностей комбинированной обработки заготовок / Е.С. Киселев, С.А. Романов, Е.Н. Лексин, О.В. Благовский // Вестник Саратовского государственного технического университета. – Саратов: СГТУ, 2009. – № 3 – С. 103 – 105.
34. Киселев, Е.С. Определение остаточных напряжений в поверхностном слое деталей с учетом технологической наследственности / Е.С. Киселев, О.В. Благовский // Вестник машиностроения. – 2011. – № 6. – С. 33-36.
35. Киселев, Е.С. Применение ультразвуковой обработки при изготовлении ответственных деталей / Е.С. Киселев, О.В. Благовский // Технология машиностроения. – 2011. – № 5. – С. 33-37.
36. Киселев, Е.С. Технологические возможности процесса комбинированной обработки шлифованием и выглаживанием / Е.С. Киселев, С.А. Романов, Е.Н. Лексин, О.В. Благовский. Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XVI международной научно-технической конференции. Т2. Донецк: 2009. с.14-20.
37. Киселев, Е.С. Ультразвуковая релаксация технологических остаточных напряжений, возникающих при высокоскоростной лезвийной обработке алюминиевых деталей / Е.С. Киселев, Е.Н. Лексин. – Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2012. – № 3. – С. 7-10.
38. Киричек, А.В. Перспективные методы комбинированного упрочнения на основе статико-импульсной обработки ППД / А.В. Киричек, Д.Е. Тарасов. – Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – № 10. – С. 44-47.

39. Климов, Ю.М. Детали механизмов авиационной и космической техники / Ю.М. Климов, Е.А. Самойлов, Н.Л. Зезин и др. – М.: Изд-во МАИ, 1996. – 334 с.
40. Ковальногов, В.Н. Снижение силовой напряженности алмазного выглаживания за счет совмещения с обработкой резанием / В.Н. Ковальногов, Д.Н. Малышев, З.В. Степчева // Материаловедение и технология конструкционных материалов – важнейшие составляющие компетенции современного инженера. Проблемы качества технологической подготовки: сборник научных трудов. – Волжский: ВИСТех (филиал) ВолгГАСУ, 2007. – с.224-227.
41. Ковальногов, В.Н. Эффективность комбинированной обработки прецизионных валов точением и алмазным выглаживанием // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: международный сборник научных трудов. – Донецк: ДНТУ, 2007. Вып. 34. – с.109-114.
42. Колесников, К.С. Технологические основы обеспечения качества машин / К.С. Колесников, Г.Ф. Баландин, А.М. Дальский и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.
43. Кондаков, А.И. Направленное формирование свойств изделий машиностроения. – М.: Машиностроение, 2005. – 352 с.
44. Королев, А.В. Ультразвуковое снятие остаточных напряжений с использованием эффекта кавитации / А.В. Королев, М.Г. Бабенко, С.В. Слесарев. – Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2009. – Т. 1. – № 4. – С. 52-56.
45. Корчак, С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
46. Коттрелл, А.Х. Дислокации и пластическое течение в кристаллах. – М.: Металлургиздат, 1958. – 390 с.
47. Кравченко, Б.А. Теория формирования поверхностного слоя деталей машин при механической обработке. – Куйбышев: КПТИ, 1981. – 90 с.

48. Кречетов, А.А. Накопление деформации и исчерпание запаса пластичности на стадии циклической долговечности. – Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 2. – С. 30-33.
49. Кречетов, А.А. Функциональная модель технологического наследования наноструктурированного состояния поверхностного слоя на стадиях жизненного цикла деталей машин. – Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. – № 12. – С. 10-15.
50. Кудря, А.В. Вклад технологической наследственности в появление неоднородности вязкости конструкционных сталей / А.В. Кудря, Э.А. Соколовская, В.А. Траченко, К.В. Коротнева. – Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2013. – № 3. – С. 202-204.
51. Кузнецов, В.Д. Поверхностная энергия твердых тел. – М.: ГИТТЛ, 1954.
52. Кузнецов, В.П. Классификационные признаки и возможности технологического процесса наноструктурирующего выглаживания / Технологическое обеспечение машиностроительных производств: сб. научных трудов международной НТК. – Челябинск: ЮУрГУ, 2014. – С. 418-423.
53. Кузнецов, В.П. Теплофизические основы наноструктурирующего выглаживания / В.П. Кузнецов, В.Г. Горгоц, А.С. Скоробогатов, Г.С. Анисимова // Инновации в машиностроении – основа технологического развития России: материалы международной НТК. – Барнаул: АлтГТУ, 2014. – С. 208-214.
54. Лукьянов, А.А. Расчет площади пятна контакта при обработке поверхностно-пластическим деформированием / Технологическое обеспечение машиностроительных производств: сб. научных трудов международной НТК. – Челябинск: ЮУрГУ, 2014. – С. 555-560.
55. Лесюк, Е.А. Влияние режима ультразвуковой упрочняющей обработки на качество обрабатываемой поверхности / Е.А. Лесюк, В.П. Алехин, Ким Чанг Сик. – Вестник машиностроения. – 2008. - № 9. – С. 52-55.
56. Малышев, В.И. Анализ взаимосвязи плотности дислокаций с пластической деформацией поверхностного слоя при обычном и ультразвуковом алмазном выглаживании / В.И. Малышев, А.С. Селиванов. – Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2009. – № 6. – С. 7-13.

57. Марков, А.И. Ультразвуковая обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1980. – 237 с.
58. Маталин, А.А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин. - Киев: «Техника», 1971. – 250 с.
59. Маталин, А.А. Технология машиностроения. – СПб.: Лань, 2010. – 512 с.
60. Махалов, М.С. Расчетная модель остаточных напряжений упрочненного поверхностного слоя после обработки поверхностным пластическим деформированием / М.С. Махалов, В.Ю. Блюменштейн. – Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 4. – С. 12-20.
61. Меделяев, И.А. Технологическая наследственность в узлах трения транспортной техники. – Вестник машиностроения. – 2012. – № 12. – С. 43-46.
62. Овчинникова, Н.В. Модельная задача для исследования процессов поверхностного упрочнения пластическим деформированием с применением ультразвуковых воздействий / Н.В. Овчинникова, Д.Г. Павлов, Ю.В. Чеботаревский. – Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2007. – Т. 1. – № 4. – С. 14-18.
63. Одинг, И.А. Исследования жаропрочных сталей и сплавов / И.А. Одинг, Ф.И. Алешкин. – М.: Наука. – 1964. – № 9 – С. 63.
64. Одинцов, А.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
65. Петренко, К.П. Определение параметров наследственных очагов деформации в процессах резания и поверхностного пластического деформирования. – Упрочняющие технологии и покрытия. – 2012. – № 6. – С. 3-7.
66. Петренко, К.П. Структурная модель проектирования упрочняющих технологических процессов, обеспечивающих заданное качество поверхностного слоя. – Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 1. – С. 7-9.
67. Подураев, В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. Учеб. пособие для вузов. М., «Высшая школа», 1974. – 310 с.

68. Расторгуев, Г.А. Качество поверхностного слоя и технологическая наследственность. – Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2014. – № 3. – С. 32-43.
69. Расторгуев, Г.А. Оптимальная последовательность операций механической обработки с учетом технологической наследственности. – Вестник машиностроения. – 2013. – № 11. – С. 41-43.
70. Расторгуев, Г.А. Особенности технологического наследования в машиностроительном производстве. – Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2013. – № 9. – С. 8-17.
71. Ровинский, Б.М. Влияние термомеханической обработки на релаксационную стойкость сталей и сплавов / Известия ОТН АН СССР. – 1954. – №2. – С. 67.
72. Рыжов, Э.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / Э.В. Рыжов, А.Г. Суслов, В.П. Федоров. – М.: Машиностроение, 1979. – 175 с.
73. Селиванов, А.С. К оценке эффективности технологии ультразвукового выглаживания / А.С. Селиванов, А.С. Ирсецкий, П.П. Митяков // Технологическое обеспечение машиностроительных производств: сб. научных трудов международной НТК. – Челябинск: ЮУрГУ, 2014. – С. 455-459.
74. Смелянский, В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.
75. Солнцев, Ю.П. Металлы и сплавы. Справочник. – Санкт-Петербург: НПО "Профессионал", 2003. – 350 с.
76. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: Справочник / Л.В. Худобин, А.П. Бабичев, Е.М. Булыжев и др. / Под общ. ред. Л.В. Худобина. – М.: Машиностроение, 2006. – 544 с.
77. Старков, В.К. Дислокационные представления о резании металлов. – М.: Машиностроение, 1979. – 160 с.
78. Сулима, А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.

79. Суслов, А.Г. Инженерия поверхности деталей на этапах их жизненного цикла. – Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2006. – № 4. – С. 2-4.
80. Суслов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
81. Суслов, А.Г. Проектирование операций отделочно-упрочняющей обработки поверхностно-пластическим деформированием / А.Г. Суслов, Р.В. Гуров. – Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – № 3. – С. 14-16.
82. Сухой, Д.С. Прогнозирование погрешности механической обработки с учетом технологической наследственности. – СТИН. – 2008. – № 4. – С. 18-21.
83. Торбило, В.М. Алмазное выглаживание. – М.: Машиностроение, 1972. – 104с.
84. Хейфец, М.Л. Технологическое наследование физико-механических и геометрических параметров качества материала и поверхности детали / М.Л. Хейфец, А.С. Васильев, С.А. Клименко, Л. Танович // Современные наукоемкие технологии, оборудование и инструменты в машиностроении: сб. трудов международной НТК. – СПб.: Из-во Политехнического университета, 2014. – С. 275-285.
85. Хромченко, Ф.А. Технология и оборудование для термической обработки сварных соединений / Хромченко Ф.А., Корольков П.М. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 200с.
86. Чудина, О.В. Поверхностное упрочнение сталей в процессе ультразвуковой обработки в жидких средах / О.В. Чудина, Д.С. Фатюхин, В.А. Хачатурян. – Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – № 9. – С. 14-16.
87. Шендеров, И.Б. Основы методологии обеспечения эксплуатационной точности деталей машин и механизмов на этапах проектирования и разработки технологии их изготовления. – Вестник машиностроения. – 2005. – № 2. – С. 65-69.
88. Шестаков, С.Д. Ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование для упрочнения и пассивации наклепом: теория, технологические про-

- цессы и оборудование. – Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 7. – С. 3-15.
89. Ямников, А.С. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов / А.С. Ямников, Ю.Н. Федоров, Г.М. Шейнин, В.П. Кузнецов, В.Н. Киселев и др.; под ред. А.С. Ямникова. – Тула: ТулГУ, 2006. – 269 с.
90. Ящерицын, П.И. Технологическая наследственность в машиностроении / П.И. Ящерицын, Э.В. Рыжов, В.И. Аверченков. – Мн.: «Наука и техника», 1977. – 256 с.
91. Aviles, R. Influence of low-plasticity ball burnishing on the high-cycle fatigue strength of medium carbon AISI 1045 steel / R. Aviles, J. Albizuri, A. Rodriguez, L.N. Lopez de Lacalle // International Journal of Fatigue. – 2013. – Vol. 55. – P. 230-244.
92. Balland, P. Mechanics of the burnishing process / P. Balland, L. Tabourot, F. Degre, V. Moreau // Precision Engineering. – 2013. – Vol. 37(1). – P. 129-134.
93. Das, A.K. Technological heredity in spur gear manufacturing / Journal of Materials Processing Technology. – 1999. – Vol. 91(1-3). – P. 66-74.
94. Hosseini-Toudeshky, H. Effects of curing thermal residual stresses on fatigue crack propagation of aluminum plates repaired by FML patches / H. Hosseini-Toudeshky, M. Sadighi, A. Vojdani // Composite Structures. – 2013. – Vol. 100. – P. 154-162.
95. Liu, Y. Determination of the plastic properties of materials treated by ultrasonic surface rolling process through instrumented indentation / Y. Liu, X. Zhao, D. Wang // Materials Science and Engineering: A. – 2014. – Vol. 600. – P. 21-31.
96. Liu, Y. Finite element modeling of ultrasonic surface rolling process / Y. Liu, L. Wang, D. Wang // Journal of Materials Processing Technology. – 2011. – Vol. 211(12). – P. 2106-2113.
97. Loh, N.H. Application of experimental design in ball burnishing / N.H. Loh, S.C. Tam, S. Miyazawa // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1993. – Vol. 33(6). – P. 841-852.

98. Loh, N.H. Investigations on the surface roughness produced by ball burnishing / N.H. Loh, S.C. Tam, S. Miyazawa // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1991. – Vol. 31(1). – P. 75-81.
99. Loh, N.H. Surface hardening by ball burnishing / N.H. Loh, S.C. Tam, S. Miyazawa // Tribology International. – 1990. – Vol. 23(6). – P. 413-417.
100. Klocke, F. Roller burnishing of hard turned surfaces / F. Klocke, J. Liermann // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1998. – Vol. 38(5-6). – P. 419-423.
101. Konefal, K. Improved corrosion resistance of stainless steel X6CrNiMoTi17-12-2 by slide diamond burnishing / K. Konefal, M. Korzynski, Z. Byczkowska, K. Korzynska // Journal of Materials Processing Technology. – 2013. – Vol. 213(11). – P. 1997-2004.
102. Korzynski, M Fatigue strength of chromium coated elements and possibility of its improvement with slide diamond burnishing / M. Korzynski, A. Pacana, J. Cwanek // Surface and Coatings Technology/ - 2009. – Vol. 203 (12). – P. 1670-1676.
103. Korzynski, M. Surface layer characteristics due to slide diamond burnishing with a cylindrical-ended tool / M. Korzynski, J. Lubas, S. Swirad, K. Dudek // Journal of Materials Processing Technology. – 2011. – Vol. 211(1). – P. 84-94.
104. Markovic, S.Lj. Technological heredity – A decisive factor for tribological features of regenerated gears / S.Lj. Markovic, T.M. Lazovic // Engineering Failure Analysis. – 2014. – Vol. 42. – P. 121-132.
105. Prevey, P. The influence of surface enhancement by low plasticity burnishing on the corrosion fatigue performance of AA7075-T6 / P. S. Prevey, J. T. Cammett // International Journal of Fatigue. – 2004. – Vol. 26(9). – P. 975-982.
106. Prokoshkina, V.G. Structure heredity, aging and stability of strengthening of Cr–Ni maraging steels / V.G. Prokoshkina, L.M. Kaputkina // Materials Science and Engineering: A. – 2006. – Vol. 438-440. – P. 222-227.
107. Regazzi, D. An investigation about the influence of deep rolling on fatigue crack growth in railway axles made of a medium strength steel / D. Regazzi, S. Beretta, M. Carboni // Engineering Fracture Mechanics. – 2014. – Vol. 131. – P. 587-601.

108. Revankar, G.D. Analysis of surface roughness and hardness in ball burnishing of titanium alloy / G.D. Revankar, R. Shetty, S.S. Rao, V.N. Gaitonde // Measurement. – 2014. – Vol. 58. – P. 256-268.
109. Rodriguez, A. Surface improvement of shafts by the deep ball-burnishing technique / A. Rodriguez, L.N. Lopez de Lacalle, A. Celaya, A. Lamikiz, J. Albizuri // Surface and Coatings Technology. – 2012. – Vol. 206(11-12). – P. 2817-2824.
110. Tolga Bozdana, A. Deep cold rolling with ultrasonic vibrations—a new mechanical surface enhancement technique / A. Tolga Bozdana, N.N.Z. Gindy, H. Li // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2005. – Vol. 45(6). – P. 713-718.
111. Xiong, Z. Heredity characteristic from hot rolled microstructure to annealed microstructure in high strength TRIP steels / Z. Xiong, Q. Cai, H. Jiang // Journal of Iron and Steel Research, International. – 2010. – Vol. 17(10). – P. 38-44.
112. Zhang, Ch. Heredity in the Microstructure and Mechanical Properties of Hot-rolled Spring Steel Wire 60Si2MnA during Heat Treatment Process / Ch. Zhang, L. Zhou, Y. Liu // Journal of Materials Science & Technology. – 2013. – Vol. 29(1). – P. 82-88.
113. Каталог режущего инструмента и технологической оснастки фирмы «Korloy Inc.» [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: www.korloy.com.
114. РДМУ 109-77. Методические указания. Методика выбора и оптимизации контрольных параметров технологических процессов. – М.: Издательство стандартов, 1978.

ПРИЛОЖЕНИЯ

П 1.1. Состав опытов по исследованию влияния элементов режима комбинированной обработки точением и УЗТВ на технологические остаточные напряжения и фазовый состав поверхностного слоя заготовок

(экспериментальная установка на базе токарного станка УТ16П, твердосплавная пластина – см. табл. 3.5; СОЖ – 3%-ый водный раствор продукта «Велс-1» (этап точения, общий объемный расход СОЖ 10 л/мин), 100%-ый концентрат продукта «Велс-1» (этап выглаживания, общий расход концентрата СОЖ 5 г/мин).

№ се- рии опытов	Материал заготовки	Элементы режима обработки				Критерии оценки эффек- тивности про- цесса
		t , мм	V_z , м/мин	S , мм/об	P , Н	
1	2	3	4	5	6	7
1	30ХГСА	0,5	44	0,054	200	Касательные ТОН σ_z , МПа
2		0,75	44	0,054	200	
3		1,0	44	0,054	200	
4		0,75	35,2	0,054	200	
5		0,75	54,9	0,054	200	
6		0,75	44	0,046	200	
7		0,75	44	0,064	200	
8		0,75	44	0,054	100	
9		0,75	44	0,054	300	
10	40Х13	0,5	69,1	0,054	200	σ_z
11		0,75	69,1	0,054	200	
12		1,0	69,1	0,054	200	
13		0,75	54,4	0,054	200	
14		0,75	86,4	0,054	200	
15		0,75	69,1	0,046	200	
16		0,75	69,1	0,064	200	
17		0,75	69,1	0,054	100	
18		0,75	69,1	0,054	300	
19	07Х16Н6	0,5	59,3	0,054	200	σ_z , отношение объема γ -Fe к α -Fe V_γ/V_α
20		0,75	59,3	0,054	200	
21		1,0	59,3	0,054	200	
22		0,75	47,1	0,054	200	
23		0,75	75,4	0,054	200	
24		0,75	59,3	0,046	200	
25		0,75	59,3	0,064	200	
26		0,75	59,3	0,054	100	
27		0,75	59,3	0,054	300	

Продолжение приложения 1

1	2	3	4	5	6	7
28	BT9	0,5	45,5	0,054	200	σ_Z , отношение объема α -Ti к β -Fe V_α/V_β
29		0,75	45,5	0,054	200	
30		1,0	45,5	0,054	200	
31		0,75	36,4	0,054	200	
32		0,75	57,4	0,054	200	
33		0,75	45,5	0,046	200	
34		0,75	45,5	0,064	200	
35		0,75	45,5	0,054	100	
36		0,75	45,5	0,054	300	
37	BT3-1	0,5	45,5	0,054	200	σ_Z , V_α/V_β
38		0,75	45,5	0,054	200	
39		1,0	45,5	0,054	200	
40		0,75	36,4	0,054	200	
41		0,75	57,4	0,054	200	
42		0,75	45,5	0,046	200	
43		0,75	45,5	0,064	200	
44		0,75	45,5	0,054	100	
45		0,75	45,5	0,054	300	

П 1.2. Состав опытов по исследованию технологической наследственности остаточных напряжений и фазового состава поверхностного слоя заготовок

(экспериментальная установка на базе токарного станка УТ16П, твердосплавная пластина – см. табл. 3.5; СОЖ – 3%-ый водный раствор продукта «Велс-1» (этап точения, общий объемный расход СОЖ 10 л/мин), 100%-ый концентрат продукта «Велс-1» (этап выглаживания, общий расход концентрата СОЖ 5 г/мин); элементы режима последующего шлифования указаны в табл. 3.6.

№ серии опытов	Материал заготовки	Элементы режима обработки				Критерии оценки эффективности процесса
		t , мм	V_z , м/мин	S , мм/об	P , Н	
46	30ХГСА	0,75	35,2	0,064	100	σ_z , контактная температура T , °C
47		1	54,9	0,046	200	
48		0,5	44	0,054	300	
49	40Х13	0,75	91,1	0,054	300	σ_z
50		1	57,4	0,064	200	
51		0,5	72,8	0,046	100	
52	07Х16Н6	0,75	59,3	0,054	100	σ_z , V_α/V_γ
53		0,5	75,4	0,046	200	
54		1	47,1	0,064	300	
55	ВТ9	1	57,4	0,054	100	σ_z , V_α/V_β
56		0,75	45,5	0,046	300	
57		0,5	36,4	0,064	200	
58	ВТ3-1	0,75	63,5	0,064	300	σ_z , V_α/V_β
59		0,5	50,8	0,046	100	
60		1	40,6	0,054	200	

П 1.3. Состав опытов по исследованию влияния элементов режима УЗ-релаксации на эффективность снятия технологических остаточных напряжений

(экспериментальная установка на базе токарного станка УТ16П, твердосплавная пластина – см. табл. 3.5; СОЖ – 100%-ый концентрат продукта «Велс-1», общий расход концентрата СОЖ 5 г/мин.

№ серии опытов	Материал заготовки	Элементы режима обработки		Критерии оценки эффективности процесса
		T , мин	P , Н	
1	2	3	4	5
61	30ХГСА	0,5	10	σ_Z
62		1	10	
63		1,5	10	
64		2	10	
65		1	5	
66		1	15	
67		1	20	
68	40Х13	0,5	10	σ_Z
69		1	10	
70		1,5	10	
71		2	10	
72		1	5	
73		1	15	
74		1	20	
75	07Х16Н6	0,5	10	σ_Z
76		1	10	
77		1,5	10	
78		2	10	
79		1	5	
80		1	15	
81		1	20	
82	ВТ9	0,5	10	σ_Z
83		1	10	
84		1,5	10	
85		2	10	
86		1	5	
87		1	15	
88		1	20	

1	2	3	4	5
89	BT3-1	0,5	10	σ_z
90		1	10	
91		1,5	10	
92		2	10	
93		1	5	
94		1	15	
95		1	20	