

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Д. Л. СКУРАТОВ, Д. В. ЕВДОКИМОВ, А. Н. ШВЕЦОВ

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА
И ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ
ДЕТАЛЕЙ МАШИН И АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ**

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве учебного пособия для обучающихся по основным образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 13.03.03 Энергетическое машиностроение, 15.03.01 Машиностроение, 24.03.05 Двигатели летательных аппаратов и специальности 24.05.02 Проектирование авиационных и ракетных двигателей

С А М А Р А
Издательство Самарского университета
2024

УДК 621.9(075)

ББК К63-1я7

С467

Рецензенты: д-р техн. наук, доц. А. С. Б у к а т ы й,
д-р техн. наук, проф. И. Н. Х а й м о в и ч

Скуратов, Дмитрий Леонидович

С467 **Обеспечение качества и эксплуатационной надежности деталей машин и авиационной техники:** учебное пособие / Д. Л. Скуратов, Д. В. Евдокимов, А. Н. Швецов. – Самара: Издательство Самарского университета, 2024. – 104 с.

ISBN 978-5-7883-2123-3

Приведены геометрические и физико-химические параметры, используемые для характеристики поверхностного слоя деталей. Показано влияние параметров поверхностного слоя на характеристики эксплуатационной надежности деталей машин и авиационной техники. Кратко описаны математические модели и методы оптимизации, используемые для поиска наивыгоднейших параметров обработки, обеспечивающих требуемое качество поверхности деталей.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по машиностроительным направлениям подготовки и специальностям при изучении курсов, связанных с технологией изготовления изделий различных отраслей промышленности. Будет полезно магистрантам и аспирантам.

Подготовлено на кафедре технологий производства двигателей Самарского университета.

УДК 621.9(075)

ББК К63-1я7

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. ПАРАМЕТРЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ.....	6
1.1. Понятие качества поверхностей деталей машин.....	6
1.1.1. Геометрические параметры качества.....	7
1.1.2. Физико-механические и химические характеристики поверхностного слоя.....	30
1.1.3. Механизм формирования остаточных напряжений.....	34
2. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ, НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ДЕТАЛЕЙ МАШИН.....	44
2.1. Влияние геометрических параметров качества на эксплуатационные характеристики.....	44
2.1.1. Влияние геометрических размеров.....	44
2.1.2. Влияние отклонений формы.....	45
2.1.3. Влияние волнистости поверхности.....	48
2.1.4. Влияние шероховатости поверхности.....	51
2.2. Влияние физико-механических и химических характеристик поверхностного слоя на эксплуатационные показатели.....	61
2.2.1. Влияние деформационного упрочнения.....	61
2.2.2. Влияние остаточных напряжений.....	67
2.2.3. Влияние структурно-фазового состояния и химических характеристик.....	75
3. МЕТОДОЛОГИЯ И СРЕДСТВА ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ И ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ.....	81
3.1. Оптимизация как эффективный метод управления механической обработкой.....	81
3.2. Модели оптимизации.....	86
3.3. Методы оптимизации.....	91
Заключение.....	97
Библиографический список.....	98

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение надежности и ресурса изделий машиностроения, в частности, авиационной техники, морских и речных судов, автомобилей и т.д., является комплексной научно-технической и технико-экономической проблемой. Решение этой проблемы достигается за счет совершенства конструкции изделий, технологии их изготовления и обеспечения стабильности производства, улучшения качества и стабильности свойств используемых материалов и покупных комплектующих, строгого соблюдения правил эксплуатации и обслуживания изделий и т.д. В представленном пособии рассматривается одна из технологических составляющих этой проблемы, а именно обеспечение параметров качества поверхностей деталей.

Среди различных технологических процессов, применяемых в машиностроении, обработка материалов резанием и поверхностным пластическим деформированием относятся к основным процессам формообразования и упрочнения деталей при их изготовлении. На данных процессах обеспечиваются заданные требования к точности геометрических параметров, отклонениям формы и расположения поверхностей, шероховатости поверхности, а также параметры, характеризующие состояние поверхностного слоя: остаточные напряжения, микротвердость и структурно-фазовое состояние материала. Обеспечение заданных параметров качества обработки осуществляется за счет выбора оптимальных или рациональных видов или условий формообразования, как правило, на основе использования математических моделей и соответствующих методов оптимизации.

Следует отметить, что, несмотря на совершенствование технологий получения заготовок и существенное снижение объема обдирочных и черновых операций, число чистовых операций возрастает. Это обусловлено, с одной стороны, усложнением формы деталей, а, с другой стороны, повышением требований к качеству обработки. Поэтому в ближайшем будущем снижения объема процессов механической обработки материалов – не ожидается.

В учебном пособии изложено также влияние параметров качества обработки поверхностей на эксплуатационную надежность деталей и, следовательно, изделий в целом.

Пособие будет полезно при подготовке бакалавров, магистров и специалистов соответственно по машиностроительным направлениям и специальностям, сфера деятельности которых связана с механической обработкой материалов и проектированием технологических процессов изготовления деталей, в том числе авиационной техники и других отраслей промышленности.

1. ПАРАМЕТРЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

1.1. ПОНЯТИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

К проектированию, производству и эксплуатации современной научноёмкой продукции, к которой, безусловно, относятся и изделия авиационной техники, предъявляются очень высокие требования. Это обусловлено тем, что многие детали данной техники имеют сложное конструктивное исполнение, испытывают значительные знакопеременные нагрузки и вибрацию, работают при повышенных и высоких температурах и должны при этом обладать заданными эксплуатационными свойствами. Следует отметить, что эти свойства обеспечиваются не только выбором соответствующей марки материала, например, высокопрочных, коррозионностойких и жаропрочных сталей, жаростойких и жаропрочных сплавов, титановых сплавов и т.д., относящихся к категории труднообрабатываемых, но и во многом технологическими процессами, по которым они изготовлены и определяющими качество поверхности деталей.

Под *качеством поверхности* детали, согласно утверждению авторов работы [50], следует понимать свойства ее поверхностного слоя, которые формируются в результате воздействия на поверхность одного или нескольких последовательно применяемых технологических методов обработки, базирующихся на формообразовании материалов резанием, термохимической обработке, поверхностном пластическом деформировании (ППД) и т.д. Качество поверхности детали определяется геометрическими, физико-механическими и химическими параметрами и характеристиками.

К геометрическим параметрам следует отнести точность выполнения диаметральных, линейных и угловых размеров, точность формы, волнистость и шероховатость поверхности. К физико-механическим и химическим параметрам и характеристикам поверхности относятся микротвердость, остаточные напряжения, а также структурное и фазовое состояние.

1.1.1. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КАЧЕСТВА

Геометрические размеры. Допуски и посадки на линейные размеры устанавливают ГОСТ Р 25346-2013 [57], ГОСТ Р 25347-2013 [58] и ГОСТ Р 25348-82 [56], а на угловые размеры и конические соединения ГОСТ Р 53440-2009 [59], ГОСТ Р 53441-2009 [60], ГОСТ 8908-81 [53], ГОСТ 25307-82 [55]. При этом точность выполнения размеров должна стablyно обеспечиваться разработанными технологиями и применяемыми в условиях производства технологическими процессами изготовления деталей. На обеспечение точности геометрических параметров деталей влияют точность изготовления металлорежущего оборудования, жесткость технологической системы (станок – приспособление – инструмент – заготовка), температурные погрешности, вызванные нагревом заготовки и узлов станка, погрешности установки и базирования заготовки, погрешности, вызванные напряжениями, а также погрешности, обусловленные силами закрепления заготовки в патроне, приспособлении или на столе станка. Подробно влияние указанных ранее факторов на точность геометрических параметров изложено в работах [17, 48].

Отклонения формы. Отклонением формы называют отклонение формы реальной поверхности или профиля геометрического элемента от формы его номинальной поверхности или профиля. Под номинальными понимаются идеальные поверхность или профиль геометрического элемента детали, заданные чертежом или другой технической документацией. Геометрический элемент представляет собой отдельную часть детали, такую как точка,

линия или поверхность. Он может быть полным элементом (поверхность, линия на поверхности) или производным элементом (центральная точка, средняя линия, средняя поверхность). В зависимости от нормируемой геометрической характеристики элемента и способа указания допуска формы на чертеже, поле допуска может представлять собой область: внутри окружности; между двумя концентрическими окружностями; между двумя равноотстоящими (эквидистантными) линиями или двумя параллельными прямыми линиями; внутри цилиндра; между двумя соосными цилиндрами; между двумя равноотстоящими (эквидистантными) поверхностями или двумя параллельными плоскостями; внутри сферы. ГОСТ Р 53442-2015 [61] предусматривает нормирование шести отклонений формы поверхностей деталей: отклонение от прямолинейности в плоскости и в пространстве; отклонение от плоскостности; отклонение от круглости; отклонение от цилиндричности; отклонение формы заданного профиля и отклонение формы заданной поверхности. При этом реальные поверхность или профиль элемента детали должны находиться в пределах поля допуска, который указывается на рабочем чертеже.

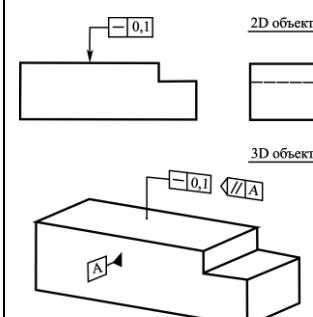
Согласно указанному ранее ГОСТу поле допуска – это область на плоскости или в пространстве, ограниченная одной или несколькими идеальными линиями или поверхностями и характеризуемая равным значениюю допуска t_{ϕ} линейным размером. А допуск, как известно, определяет точность изготовления детали. Чем меньше значение допуска устанавливаемого на размер элемента, тем сложнее его обеспечить, т.к. повышаются требования к точности станка, приспособления, квалификации рабочего и т.д. Допуски на отклонения формы устанавливаются исходя из функциональных требований, предъявляемых к деталям, входящих в состав изделий, а также на основании использования рекомендаций, например, приведенных в ГОСТ 24643-81 [54].

Согласно ГОСТ 24643-81 для каждого вида допуска формы установлено 16 степеней точности от 1 (точной) до 16 (грубой). В зависимости от соотношения (t_{ϕ}/T) между допуском формы t_{ϕ} и допуском размера T для тех видов допусков формы, которые являются составной частью допуска размера на основе истолкования предельных размеров по ГОСТ 25346-2013, рекомендуются три уровня относительной геометрической точности: A – нормальная (60 % от T); B – повышенная (40 % от T); C – высокая (25 % от T). Допуски формы цилиндрических поверхностей, соответствующие уровням точности A , B и C , составляют примерно 30, 20 и 12 % допуска размера, т.к. допуск формы ограничивает отклонение радиуса, а допуск размера отклонение диаметра поверхности.

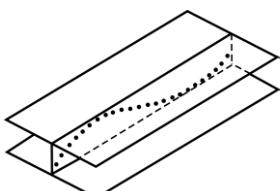
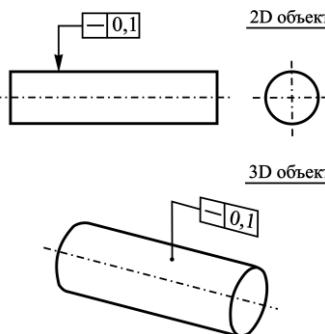
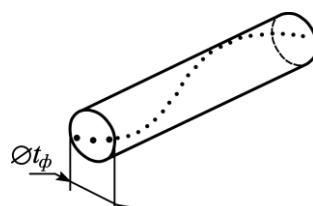
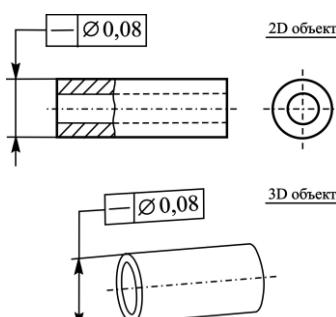
В табл. 1.1, в соответствии с ГОСТ Р 53442-2015, приведены определения и графические изображения различных геометрических допусков формы (п. 1.1, 1.3, 1.5, 1.7, 1.9, 1.12, 1.14, 1.16, 1.18, 1.20) с примерами указания на чертеже и пояснениями (п. 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 1.10, 1.11, 1.13, 1.15, 1.17, 1.19, 1.21).

Шероховатость и волнистость поверхности. Шероховатость поверхности – это совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами, выделенная с помощью базовой длины [2]. Шероховатость наряду с другими факторами, определяющими качество поверхности (точностью диаметральных, линейных и угловых размеров, отклонениями формы, волнистостью и физико-механическими свойствами поверхностного слоя) оказывает большое влияние на эксплуатационные свойства деталей, сборочных единиц и изделий машиностроения. В настоящее время для оценки шероховатости поверхности могут быть использованы ГОСТ 2789-73 [52] и ГОСТ Р ИСО 4287-2014 [62], последний из которых устанавливает термины, определения и параметры для оценки структуры поверхности (первичного профиля, шероховатости и волнистости) при помощи методов профилирования.

Таблица 1.1. Допуски формы поверхностей с примерами указания на чертеже и пояснениями [61]

Условный знак	Определение поля допуска и графическое изображение	Указание на чертеже и пояснение
Допуск прямолинейности		
	<p>1.1</p> <p>Поле допуска ограничено двумя параллельными прямыми, расстояние между которыми равно значению допуска t_ϕ, лежащими в плоскости, ориентированной в указанном на схеме направлении</p>  <p>a - любое расстояние</p>	<p>1.2</p> <p>Выявленная линия на нормируемой поверхности в любой плоскости, параллельной плоскости проекции, на которой указан знак (2D объект), или базовой плоскости А (3D объект), должна быть расположена между двумя параллельными прямыми, расстояние между которыми равно 0,1 мм</p>  <p>$\triangleleft \triangleleft / / A$ - графическое обозначение пересекающей плоскости с параллельным расположением относительно базы</p>
	<p>1.3</p> <p>Поле допуска ограничено двумя параллельными плоскостями, находящимися друг от друга на расстоянии, равном значению допуска t_ϕ</p>	<p>1.4</p> <p>Выявленная образующая цилиндрической поверхности должна располагаться между двумя параллельными плоскостями, расстояние между которыми равно 0,1 мм.</p> <p>П р и м е ч а н и е. Определение выявленной образующей нестандартизовано</p>

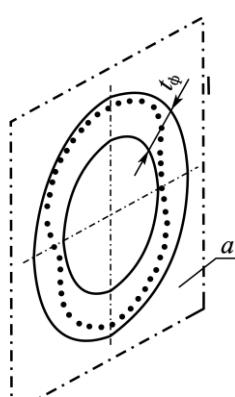
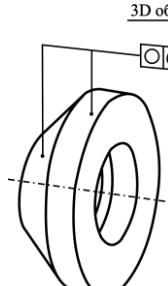
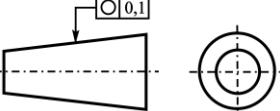
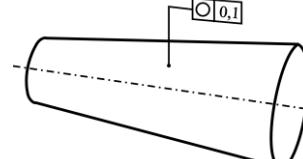
Продолжение табл. 1.1

Условный знак	Определение поля допуска и графическое изображение	Указание на чертеже и пояснение
Допуск прямолинейности		
—		
—	<p>1.5 Поле допуска ограничено цилиндром, диаметр которого равен значению допуска t_ϕ, если перед этим значением указан знак диаметра \emptyset</p> 	<p>1.6 Выявленная средняя линия нормируемой цилиндрической поверхности должна быть расположена в пределах цилиндрической области, диаметр которой равен 0,08 мм</p> 
Допуск плоскостности		
\square	<p>1.7 Поле допуска ограничено двумя параллельными плоскостями, расстояние между которыми</p>	<p>1.8 Выявленная нормируемая поверхность должна быть расположена между двумя параллель-</p>

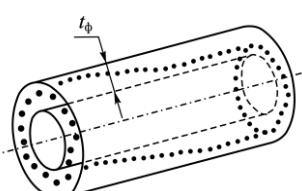
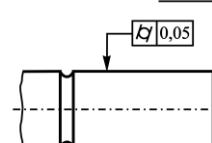
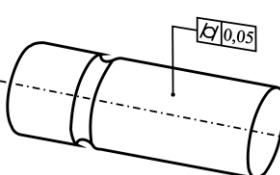
Продолжение табл. 1.1

Условный знак	Определение поля допуска и графическое изображение	Указание на чертеже и пояснение
Допуск плоскостности		
	равно значению допуска t_{ϕ} 	ными плоскостями, расстояние между которыми равно 0,08 мм
Допуск круглости		
	1.9 Поле допуска в рассматриваемом поперечном сечении ограничено двумя концентрическими окружностями, разность радиусов которых равна значению допуска t_{ϕ}	1.10 Выявленная в любом поперечном сечении цилиндрической или конической поверхности круговая линия должна быть расположена между двумя компланарными (лежащими в одной плоскости) концентрическими окружностями, разность радиусов которых равна 0,03 мм

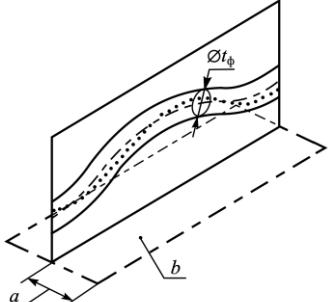
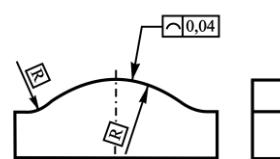
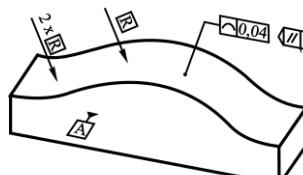
Продолжение табл. 1.1

Условный знак	Определение поля допуска и графическое изображение	Указание на чертеже и пояснение
Допуск круглости		
○	 <p><i>a</i> - любое поперечное сечение</p>	<p><u>3D объект</u></p>  <p><u>2D объект</u></p>  <p><u>3D объект</u></p>  <p>1.11 Выявленная в любом перпендикулярном оси конической поверхности поперечном сечении круговая линия должна быть расположена между двумя компланарными концентрическими окружностями, разность радиусов которых равна 0,1 мм. П р и м е ч а н и е – Определение выявленной круговой линии нестандартизовано</p>

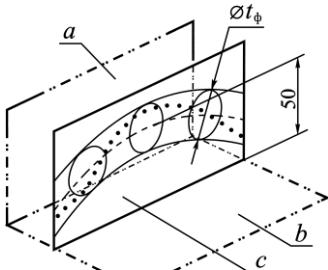
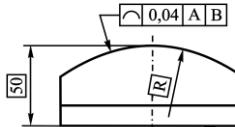
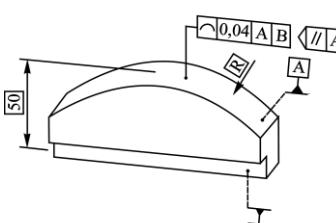
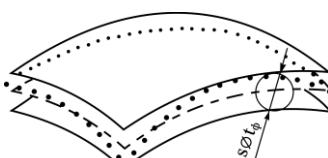
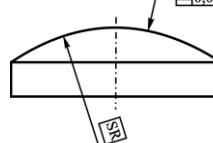
Продолжение табл. 1.1

Условный знак	Определение поля допуска и графическое изображение	Указание на чертеже и пояснение
Допуск цилиндричности		
	<p>1.12 Поле допуска ограничено двумя соосными цилиндрами, разность радиусов которых равна значению допуска t_{ϕ}</p> 	<p>1.13 Выявленная нормируемая цилиндрическая поверхность должна располагаться между двумя соосными цилиндрами, разность радиусов которых равна 0,05 мм</p> <p><u>2D объект</u></p>  <p><u>3D объект</u></p> 
Допуск формы заданного профиля безотносительно базы		
	<p>1.14 Поле допуска ограничено двумя линиями, являющимися огибающими семейства окружностей, с диаметрами, равными значению допуска t_{ϕ}, и центрами, расположеными на номинальном заданном профиле</p> 	<p>1.15 Выявленная линия на нормируемой поверхности в любой плоскости, параллельной плоскости проекции, на которой указан допуск (2D объект), или параллельной базовой плоскости А (3D объект), должна располагаться между двумя эквидистантными линиями, являющимися огибающими семейства окружностей диаметром 0,04 мм, центры которых расположены на заданном номинальном профиле</p>

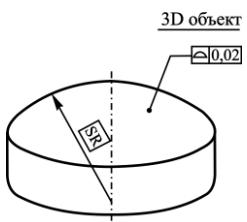
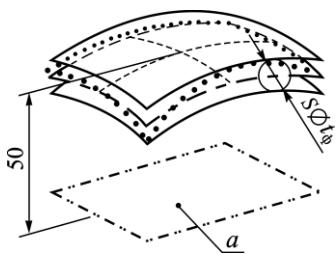
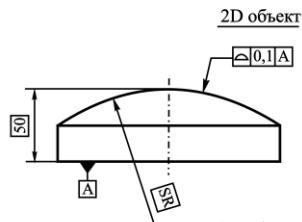
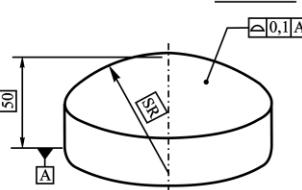
Продолжение табл. 1.1

Условный знак	Определение поля допуска и графическое изображение	Указание на чертеже и пояснение
Допуск формы заданного профиля безотносительно базы		
	 <p><i>a</i> - любое расстояние; <i>b</i> - плоскость перпендикулярная к плоскости схемы</p>	<p>2D объект</p>  <p>3D объект</p>  <p>R - теоретически точный размер радиуса</p>
Допуск формы заданного профиля относительно комплекта баз		
	<p>1.16</p> <p>Поле допуска ограничено двумя линиями, являющимися огибающими семейства окружностей, с диаметрами, равными значению допуска t_ϕ, и центрами, расположенными на заданном относительно базовых плоскостей А и В номинальном профиле</p>	<p>1.17</p> <p>Выявленная линия на нормируемой поверхности в любой плоскости, параллельной плоскости проекции, на которой указан допуск (2D объект), или параллельной базовой плоскости А (3D объект), должна располагаться между двумя эквидистантными линиями, являющимися огибающими семейства окружностей диаметром 0,04 мм, центры которых расположены на заданном относительно базовых плоскостей А и В номинальном профиле</p>

Продолжение табл. 1.1

Условный знак	Определение поля допуска и графическое изображение	Указание на чертеже и пояснение
Допуск формы заданного профиля относительно комплекта баз		
	 <p><i>a</i> - база А; <i>b</i> - база В; <i>c</i> - плоскость, параллельная базе А</p>	<p><u>2D объект</u></p>  <p><u>3D объект</u></p>  <p>[50] - теоретически точный размер</p>
Допуск формы заданной поверхности безотносительно базы		
D	<p>1.18</p> <p>Поле допуска ограничено двумя поверхностями, являющимися огибающими семейства сфер, с диаметрами, равными значению допуска t_ϕ, и центрами, расположенными на номинальной заданной поверхности</p> 	<p>1.19</p> <p>Выявленная нормируемая поверхность, должна располагаться между двумя эквидистантными поверхностями, являющимися огибающими семейства сфер диаметром 0,02 мм, центры которых расположены на заданной номинальной поверхности</p> <p><u>2D объект</u></p> 

Окончание табл. 1.1

Условный знак	Определение поля допуска и графическое изображение	Указание на чертеже и пояснение
Допуск формы заданной поверхности безотносительно базы		
	-	 <p>3D объект</p> <p>$D 0.02$</p>
Допуск формы заданной поверхности относительно базы		
	<p>1.20 Поле допуска ограничено двумя поверхностями, являющимися огибающими семейства сфер, с диаметрами, равными значениюю допуска t_ϕ, и центрами, расположеными на номинальной поверхности, заданной относительно базовой плоскости А</p>  <p>50</p> <p>$S\Phi t_\phi$</p> <p>a</p>	<p>1.21 Выявленная нормируемая поверхность, должна располагаться между двумя эквидистантными поверхностями, являющимися огибающими семейства сфер диаметром 0,1 мм, центры которых расположены на заданной относительно базовой А номинальной поверхности</p>  <p>2D объект</p> <p>$D 0.1A$</p>  <p>3D объект</p> <p>$D 0.1A$</p>

ГОСТ 2789-73 предусматривает 6 основных параметров для нормирования шероховатости поверхности: R_a – среднее арифметическое отклонение профиля; R_z – высота неровностей профиля по 10 точкам; R_{max} – наибольшая высота неровностей профиля; S_m – средний шаг неровностей профиля; S – средний шаг местных выступов профиля; t_p – относительная опорная длина профиля, а ГОСТ Р 4287-2014 – 16 параметров.

Волнистостью называется отклонение от прямолинейности или любой заданной формы поверхности, имеющее характер периодических возвышений и впадин с относительно большими шагами. Она занимает промежуточное положение между отклонениями формы и шероховатостью поверхности, оказывает влияние на работоспособность и надежность деталей, входящих в состав изделий, поэтому также подлежит нормированию. Ранее для нормирования волнистости поверхности использовались рекомендации ИСО РС 3951-73, включающие три параметра: высоту волнистости – W_z ; наибольшую высоту волнистости – W_{max} и средний шаг волнистости – S_w , а с 1 января 2016 г введен в действие ГОСТ Р ИСО 4287-2014 [62], используемый для оценки параметров структуры поверхности.

Некоторые из терминов и определений, необходимые для понимания физической сущности показателей структуры (первоначального профиля, шероховатости и волнистости) приведены далее по тексту.

Общие термины

Фильтр профиля – фильтр, разделяющий профили на длинноволновые и коротковолновые компоненты. В средствах измерения (измерительных установках и системах) для оценки первоначального профиля, а также профилей шероховатости и волнистости используют три вида фильтров λ_s , λ_c и λ_f (рис. 1.1), которые имеют аналогичные характеристики пропускания, но различную длину волны отсечки.

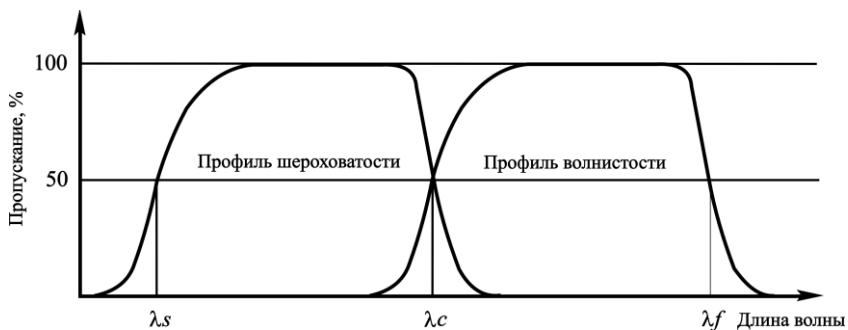


Рис. 1.1. Характеристики передачи профилей шероховатости и волнистости

Фильтр профиля λ_s – фильтр, определяющий пересечение между шероховатостью и более коротковолновыми компонентами, имеющимися на поверхности детали, и отделяющий от них шероховатость (см. рис. 1.1).

Фильтр профиля λ_c – фильтр, определяющий пересечение между компонентами шероховатости и волнистости и отделяющий их друг от друга (см. рис. 1.1).

Фильтр профиля λ_f – фильтр, определяющий пересечение между волнистостью и более длинноволновыми компонентами, имеющимися на поверхности детали, и отделяющий от них волнистость (см. рис. 1.1).

Система координат – это такая геометрическая система, в которой указаны параметры структуры поверхности. Как правило, на практике используют прямоугольную систему координат, в которой оси образуют правосторонние декартовы координаты. При этом ось X параллельна средней линии, ось Y также名义ально расположена на реальной поверхности, а ось Z направлена от материала в окружающую среду, т.е. наружу.

Реальная поверхность – поверхность, ограничивающая тело и отделяющая его от окружающей среды.

Профиль поверхности – профиль, образующийся в результате пересечения реальной поверхности заданной плоскостью (рис. 1.2), в качестве которой на практике обычно выбирают плоскость с нормалью, расположенной параллельно реальной поверхности и в соответствующем направлении.

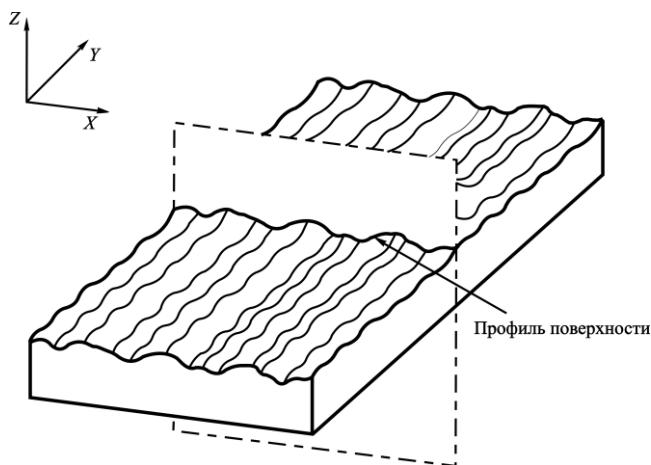


Рис. 1.2. Профиль поверхности

Базовый профиль – это траектория вершины щупа в плоскости сечения поверхности вдоль направляющей прибора. Базовый профиль представляет собой реализацию теоретически точного профиля с номинальными отклонениями, соответствующими отклонениям направляющей поверхности [46].

Полный профиль – это цифровая форма трассированного профиля, полученного относительно базового профиля с учетом заданных относительно друг друга вертикальных и горизонтальных координат [46].

Первичный профиль – это профиль, полученный после воздействия на полный профиль коротковолнового фильтра с отсеч-

кой шага λ_s и являющийся основой для оценки параметров по ГОСТ Р ИСО 4287-2014 [46].

Профиль шероховатости – модифицированный профиль, полученный из первичного профиля путем подавления длинноволнового компонента посредством фильтра профиля λ_c . Из чего следует, что полоса пропускания для профилей шероховатости определяется фильтрами профилей λ_s и λ_c .

Профиль волнистости – профиль, полученный путем последовательного применения фильтра профиля λ_f и фильтра профиля λ_c к первичному профилю, с подавлением длинноволнового компонента фильтром профиля λ_f , а также подавления коротковолнового компонента фильтром профиля λ_c ; данный профиль умышленно изменяют.

Базовая линия – линия заданной геометрической формы служащая для оценки геометрических параметров поверхности.

Средняя линия первичного профиля – это базовая линия, имеющая форму номинального первичного профиля и служащая для расчета параметров профиля, положение которой определяется посредством метода наименьших квадратов.

Средняя линия профиля шероховатости – это базовая линия, служащая для расчета параметров шероховатости поверхности на основе использования длинноволновой компоненты профиля, выделенной посредством фильтра профиля λ_c .

Средняя линия профиля волнистости – это базовая линия, необходимая для расчета параметров волнистости поверхности на основе использования длинноволновой компоненты профиля, выделенной посредством фильтра профиля λ_f .

Базовая длина (l_p , l_r , l_w) – это длина базовой линии в направлении оси X , используемая для определения неоднородностей, характеризующих оцениваемый профиль. При этом базовая длина для профилей шероховатости l_r и волнистости l_w по числовым

значениям равна соответственно характерной длине волны фильтров профиля λ_s и λ_f , а базовая длина для первичного профиля l_p равна длине оценки.

Длина оценки l_n – это длина профиля в направлении оси X , используемая для оценки изучаемого профиля. Длина оценки может быть равна одному или нескольким значениям базовой длины.

Термины геометрических параметров

P - параметр, R - параметр, W - параметр – параметры, рассчитываемые соответственно на основании первичного профиля, профиля шероховатости и профиля волнистости.

Пик профиля – часть оцениваемого профиля поверхности, направленная кнаружи, т.е. от материала контролируемого объекта в окружающую среду, и соединяющая две соседние точки пересечения указанного профиля с осью X (рис. 1.3).

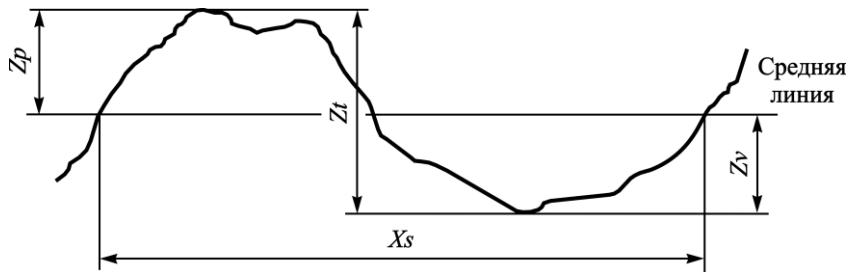


Рис. 1.3. Пик, впадина и элемент профиля

Впадина профиля – часть оцениваемого профиля поверхности, направленная внутрь, т.е. от окружающей среды к материалу контролируемого объекта, и соединяющая две соседние точки пересечения указанного профиля с осью X (см. рис. 1.3).

Элемент профиля – совокупность пика и прилегающей впадины профиля (см. рис. 1.3).

Различие высот и/или расстояний – минимальные значения высот и расстояний (шагов) пиков и впадин, учитываемые при оценке профиля. Так, минимальная высота пиков и впадин профиля обычно указывается в виде процента от P_z , R_z , W_z или другого амплитудного параметра, а минимальное расстояние определяют в виде процента от базовой длины.

Значение по оси ординат $Z(x)$ – это величина высоты оцениваемого профиля при любом положении оси X . Высоту считают отрицательной, если ордината расположена ниже оси X , в противном случае высота является положительной.

Местный угол наклона $\frac{dZ(x)}{dX}$ – это наклон оцениваемого профиля в положении X_i (рис. 1.4), численное значение которого существенно зависит от дискретности координаты ΔX [46].

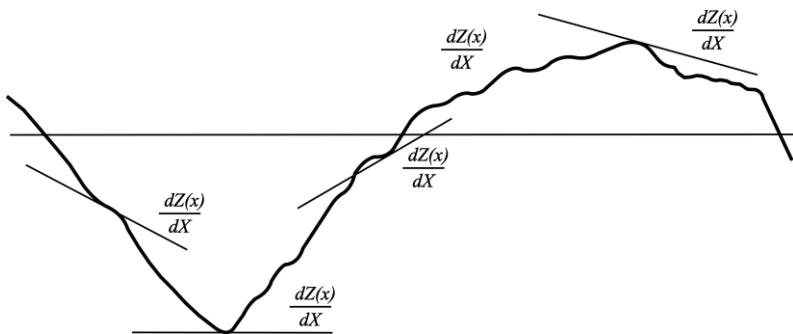


Рис. 1.4. Местный угол наклона

Высота пика профиля Z_p – расстояние между осью X и самой высокой точкой пика оцениваемого профиля (см. рис. 1.3).

Глубина впадины профиля Z_v – это расстояние между осью X и самой низкой точкой впадины оцениваемого профиля (см. рис. 1.3).

Высота элемента профиля Zt – это величина, равная сумме высоты пика и глубины впадины элемента профиля (см. рис. 1.3), т.е. $Zt = Zp + Zv$.

Ширина элемента профиля Xs – расстояние между крайними точками пересечения элемента профиля с осью X (см. рис. 1.3).

Длина материала профиля при уровне с $Ml(c)$ (опорная длина профиля) – сумма длин срезов, полученных при пересечении элемента профиля линией, параллельной оси X , при заданном уровне c (рис. 1.5).

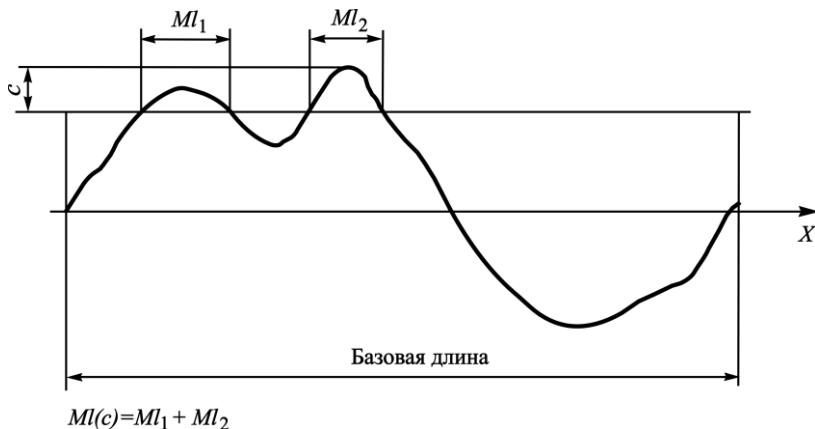


Рис. 1.5. Опорная длина профиля

Определения параметров поверхности профиля

Максимальная высота пика профиля Pp, Rp, Wp – это максимальное числовое значение высоты пика профиля Zp в пределах базовой длины (рис. 1.6).

Наибольшая глубина впадины профиля Pv, Rv, Wv – это наибольшее числовое значение глубины впадины профиля Zv в пределах базовой длины (рис. 1.6).

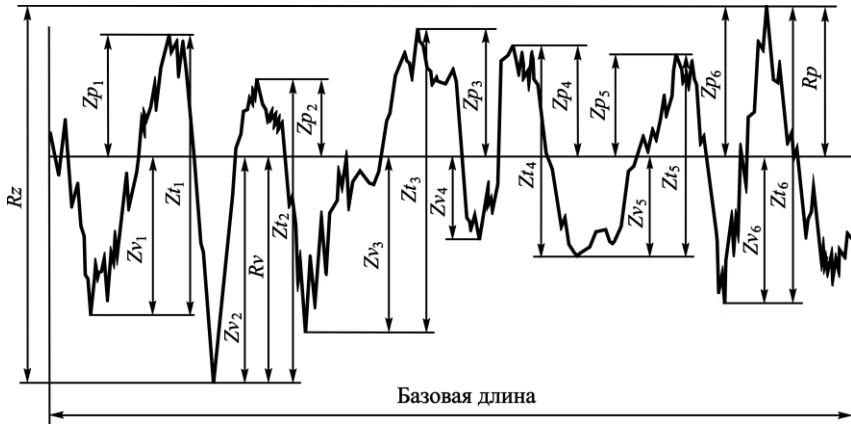


Рис. 1.6. Некоторые параметры амплитуды для профиля шероховатости

Максимальная высота профиля P_z , R_z , W_z – это сумма наибольших высоты пика профиля Z_p и глубины впадины профиля Z_v в пределах базовой длины (см. рис. 1.6). Следует иметь ввиду, что параметр R_z по ГОСТ Р ИСО 4287-2014 отличается от параметра R_z по ГОСТ 2789-73.

Средняя высота элементов профиля P_c , R_c , W_c – среднее значение высоты элементов профиля Z_t в пределах базовой длины (см. рис. 1.6), рассчитываемое по формуле

$$P_c, R_c, W_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_{t_i} .$$

Как отмечено в ГОСТ Р ИСО 4287-2014, при определении данных параметров необходимо обязательное выполнение двух условий: 1) различие высот по умолчанию, если не указано иное, должно составлять 10 % от значений P_z , R_z , W_z соответственно; 2) различие расстояний (шагов) по умолчанию должно составлять 1 % от базовой длины.

Общая высота профиля Pt, Rt, Wt – представляет собой сумму наибольшей высоты пика профиля Zp и наибольшей глубины впадины профиля Zv в пределах длины оценки. Если учесть, что параметры Pt, Rt, Wt определяются преимущественно в рамках длины оценки, а не базовой длины, то для любого профиля будут справедливы следующие зависимости:

$$Pt \geq Pz; \quad Rt \geq Rz; \quad Wt \geq Wz.$$

При этом, несмотря на то, что по умолчанию значение Pz равно значению Pt , целесообразно использовать параметр Pt .

Среднее арифметическое (или арифметическое среднее) отклонение оцениваемого профиля Pa, Ra, Wa – это среднее арифметическое (или арифметическое среднее) абсолютных значений ординаты $Z(x)$ в пределах базовой длины

$$Pa, Ra, Wa = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx,$$

где $l = lp, lr$ или lw в зависимости от оцениваемого профиля.

Среднеквадратичное отклонение оцениваемого профиля Pq, Rq, Wq – это среднеквадратичное значение ординаты $Z(x)$ в пределах базовой длины

$$Pq, Rq, Wq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx},$$

где $l = lp, lr$ или lw в зависимости от оцениваемого профиля.

Асимметрия оцениваемого профиля Psk, Rsk, Wsk – это отношение среднего кубического значения ординаты $Z^3(x)$ и Pq^3, Rq^3 или Wq^3 соответственно в пределах базовой длины. Так, например, для расчета параметра Rsk используется формула

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^3(x) dx \right],$$

а определение параметров Psk и Wsk осуществляется по аналогичным зависимостям. Указанные параметры – это показатели асимметрии вероятностной плотности распределения значений ординаты, на которые существенное влияние оказывают изолированные пики или изолированные впадины.

Эксцесс оцениваемого профиля Pku , Rku , Wku – представляет собой отношение среднего значения ординаты в четвертой степени $Z(x)$ и значения Pq , Rq или Wq в четвертой степени соответственно в пределах базовой длины. Расчет Pku , Rku и Wku осуществляется по аналогичным зависимостям. Например, для определения Rku данная зависимость имеет вид

$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^4(x) dx \right].$$

Pku , Rku и Wku – являются показателями остроты вероятностной плотности распределения значений ординаты, на которые существенно влияют изолированные пики или изолированные впадины.

Средняя ширина элементов профиля PSm , RSm , WSm – средняя ширина элемента профиля Xs в пределах базовой длины (рис. 1.7).

$$PSm, RSm, WSm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Xs_i .$$

При определении параметров PSm , RSm , WSm в обязательном порядке необходимо учитывать как различие высот, так и расстояний. Различие высот по умолчанию должно составлять 10 % от значений Pz , Rz , Wz соответственно, если не указано иное условие.

вие, а различие расстояний по умолчанию должно составлять 1 % от базовой длины.

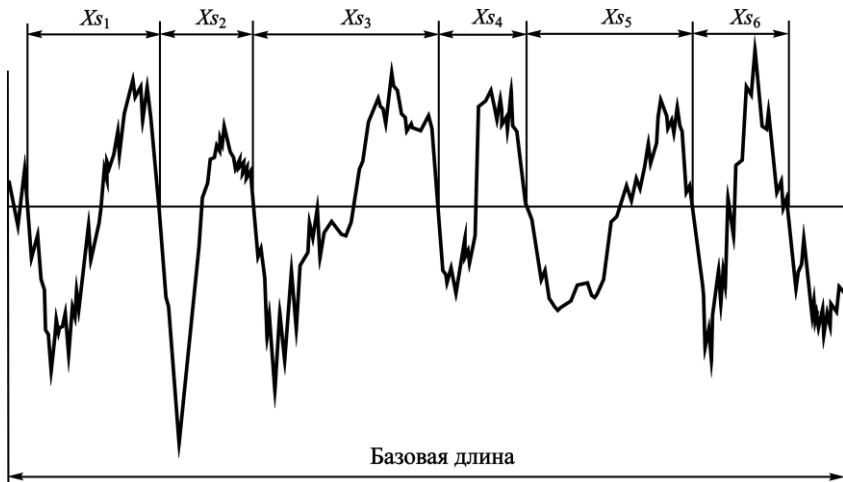


Рис. 1.7. Ширина элементов профиля

Среднеквадратичный угол наклона оцениваемого профиля $P\Delta q, R\Delta q, W\Delta q$ – это гибридный параметр, представляющий собой среднеквадратичное значение углов наклона ординаты dZ/dX в пределах базовой длины.

Коэффициент смятия профиля $Pmr(c), Rmr(c), Wmr(c)$ – отношение длины материала элементов профиля $Ml(c)$ контролируемого объекта при заданном уровне c к длине оценки.

$$Pmr(c), Rmr(c), Wmr(c) = \frac{Ml(c)}{ln}.$$

Кривая коэффициента смятия профиля (кривая Эбботта-Файрстоуна) – это кривая, отражающая коэффициент смятия профиля как функцию от уровня (рис. 1.8). Данную кривую можно

трактовать как функцию интегральной вероятности ординат $Z(x)$ контролируемого объекта в пределах оцениваемой длины.

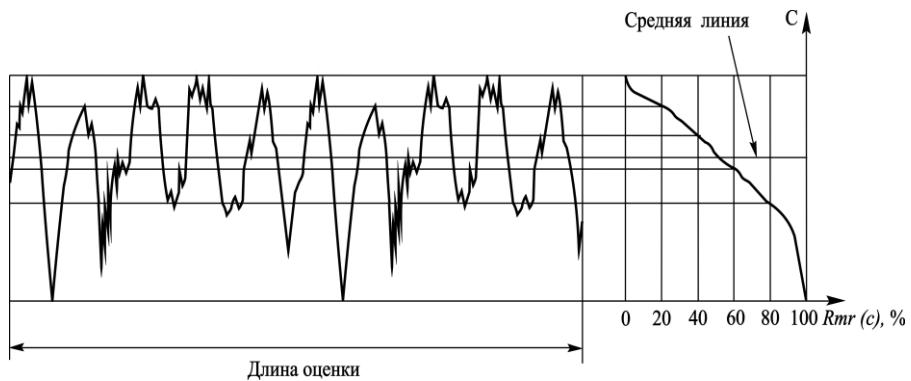


Рис. 1.8. Кривая коэффициента смятия

Другие параметры, связанные с кривой Эбботта-Файрстоуна, а также определения данных параметров приведены в ГОСТ Р ИСО 4287-2014 [62].

Волнистость поверхности занимает промежуточное положение между шероховатостью и отклонением формы поверхности. Для разграничения этих параметров условно принято считать, что неровности, для которых отношение средней ширины WSm к средней высоте Wz элементов профиля больше 50, но меньше 1000, относят к волнистости поверхности; при отношении WSm/Wz меньше 50 – относят к шероховатости поверхности; при отношении WSm/Wz , большем 1000, – относят к отклонениям формы [7, 15].

1.1.2. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

Поверхностный слой – это слой материала между наружной поверхностью заготовки и условной поверхностью эквидистантной наружной поверхности, являющейся границей различных изменений, произошедших в исходном материале в процессе обработки заготовки. Толщина и свойства поверхностного слоя зависят от суммарного силового, теплового и химического воздействия различных методов обработки и может составлять от тысячных до десятых долей миллиметра. При этом его свойства могут существенно отличаться от свойств сердцевины и во многом определяются требованиями, предъявляемыми к эксплуатационным параметрам детали. В процессе изготовления детали происходит деформационное упрочнение или разупрочнение её поверхностного слоя, т.е. изменяются микротвердость и структура, формируются остаточные напряжения и т.д.

При механической обработке резанием или посредством методов ППД поверхностный слой обрабатываемой заготовки деформируется, в результате чего изменяются его физико-механические свойства: как правило, повышаются все прочностные характеристики (пределы прочности и текучести, твердость и микротвердость); понижаются пластичность (относительное удлинение и поперечное сужение) и ударная вязкость; изменяются сопротивление усталости и износостойкость, а также структура поверхностного слоя и т.д. [32, 35].

Повышение прочностных свойств и твердости металлов и сплавов, а также изменение структуры при их пластическом деформировании называют наклепом. Под структурой металлов и сплавов, из которых изготавливаются детали, следует понимать их внутреннее строение. Как правило, поверхностный слой имеет иную структуру по сравнению с сердцевиной заготовки. Различа-

ют макро-, микро- и наноструктуру. Элементами макроструктуры являются форма и размеры зерен поликристаллов, кристаллографическая текстура, количество и размещение примесей и включений, наличие пор и трещин и т.д. К элементам микро- и наноструктуры относятся зерна одной или нескольких кристаллических фаз, межзеренные границы, дислокации и дефекты упаковки. Атомное строение определяется расположением атомов одного или нескольких элементов, а также точечными дефектами (вакансиями и межузельными атомами).

Для характеристики деформации поверхностного слоя могут использоваться различные показатели, однако в большинстве случаев применяются следующие из них:

- 1) глубина наклепанного слоя h_n ;
- 2) степень наклена поверхностного слоя, рассчитываемая по формуле

$$U_n = \frac{H_{\text{м.нб}} - H_{\text{м.с}}}{H_{\text{м.с}}} \cdot 100\% ,$$

где $H_{\text{м.нб}}$ – наибольшее значение микротвердости поверхностного слоя обработанной заготовки; $H_{\text{м.с}}$ – микротвердость ненаклепанного материала (сердцевины);

- 3) градиент наклена

$$U_{\text{гр.н}} = \frac{H_{\text{м.нб}} - H_{\text{м.с}}}{h_n} ;$$

- 4) величины, характер распределения и знак окружных и осевых остаточных напряжений, сформированных в поверхностном слое.

Исследованиями, направленными на изучение наклена в поверхностном слое заготовок после операций механической обра-

ботки материалов, установлено, что между степенью наклена и его глубиной существует зависимость вида

$$h_{\text{н}} = kU_{\text{н}},$$

где k – коэффициент пропорциональности, значения которого зависят от свойств материала заготовки и условий обработки.

На образование наклена в поверхностном слое решающее влияние оказывает силовое воздействие инструмента на заготовку. Однако, если температура в зоне обработки будет достигать значений, соответствующих началу структурных и фазовых превращений материала и более, то следует ожидать снижения микротвердости поверхностного слоя, т.е. разупрочнения.

Остаточными напряжениями называются напряжения, существующие в деталях при отсутствии внешних воздействий. Обычно эти напряжения остаются в деталях после их изготовления в результате неравномерных упруго пластических деформаций и объемных изменений при сварке, термической, механической и упрочняющей обработках [29]. При механической обработке резанием лезвийным и абразивным инструментом остаточные напряжения являются следствием действия сил резания, нагрева материала обрабатываемой заготовки и структурных превращений (при наличии). При обработке заготовок из большинства конструкционных материалов лезвийным режущим инструментом остаточные напряжения в поверхностном слое формируются главным образом под воздействием силового поля. Температура в этом случае имеет второстепенное значение, т.к. пластические деформации, возникающие вследствие воздействия силового поля, по крайней мере, на порядок больше деформаций, возникающих вследствие температурного воздействия. При обработке малопластичных и хрупких материалов формируются сжимающие остаточные напряжения, а при обработке пластичных материалов – чаще всего растягиваю-

щие [22, 23]. Подробно механизм формирования остаточных напряжений приведен в п.1.1.3.

При работе на интенсивных режимах, характеризующихся высокой температурой в зоне контакта инструмента с заготовкой, в поверхностном слое происходят структурные и фазовые превращения, приводящие за счет изменения объема материала к формированию растягивающих остаточных напряжений. Поэтому структурно-фазовое состояние (СФС) поверхностного слоя является важной характеристикой качества поверхности.

СФС материала обрабатываемых заготовок характеризуется фазовым составом, морфологией зерен и особенностями кристаллического строения фаз. Для проведения исследования СФС в настоящее время применяют различные методы, среди которых наиболее важное место занимают дифракционные и микроскопические методы [44].

Дифракционные методы базируются на явлении дифракции рентгеновского, электронного или нейтронного излучения при прохождении через кристаллическое вещество, а микроскопические методы применяют для получения увеличенного изображения контролируемого объекта. К этим методам относятся оптическая микроскопия, растровая электронная микроскопия, просвечивающая микроскопия и т.д. Подробно эти методы изложены в работах [1, 44].

В процессе лезвийной и абразивной обработки заготовок имеет место также изменение химического состава поверхностного слоя по сравнению с сердцевиной материала. Причинами этого изменения, согласно работе [44], являются: адсорбция и абсорбция материала режущего инструмента в заготовку при ее обработке; наличие температурных градиентов в поверхностном слое; различие в коэффициентах распределения и диффузии матричных элементов; налипание микрочастиц материала на режущий инстру-

мент и дискретное нанесение или «размазывание» их по обрабатываемой поверхности заготовки; микрометаллургические процессы, возникающие при «размазывании» микровключений по обрабатываемой поверхности при высоких локальных температурах; адсорбция и абсорбция химических элементов, входящих в состав смазывающе-охлаждающих технологических средств, в обрабатываемый материал. Изменения химического состава, а также структурно-фазового состояния поверхностного слоя, связанного с уменьшением объема кристаллической решетки металла при лазерной и абразивной обработке, приводят к снижению эксплуатационных характеристик деталей. Для оценки химического состава поверхностного слоя контролируемых объектов применяют: электронную оже-спектроскопию; рентгеновскую электронную спектроскопию для химического анализа, вторичную ионную масс-спектроскопию, количественный рентгеноспектральный микроанализ и т.д. [1, 44].

1.1.3. МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Изложенный далее по тексту механизм формирования остаточных напряжений предложен, теоретически обоснован и экспериментально подтвержден проф. Б.А. Кравченко [22] и его учениками. Приверженцами этой теории являются и авторы данного пособия, также подтвердившие её на основе экспериментальных исследований.

Любой процесс механической обработки материалов сопровождается появлением остаточных пластических деформаций, вызывающих изменение геометрических параметров поверхностного слоя обрабатываемой заготовки, а именно его линейных размеров. Однако нижележащие упругонапряженные слои, с которыми верхний деформированный слой неразрывно связан, противодействуют этим изменениям. В результате таких явлений в поверхностном

слое формируются растягивающие либо сжимающие остаточные напряжения, величина которых может достигать предела прочности обрабатываемого материала.

Для простоты и наглядности механизм формирования остаточных напряжений рассмотрим при свободном прямоугольном резании малопластичных и пластичных материалов, схема которого приведена на рис. 1.9.

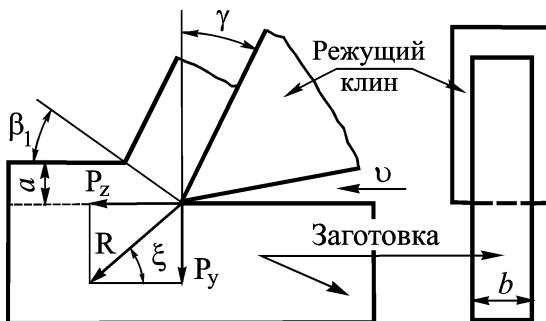


Рис. 1.9. Схема свободного прямоугольного резания:
 γ – передний угол; β_1 – угол сдвига (скользования); a – толщина среза;
 b – ширина заготовки; R – сила резания; P_z – главная составляющая
силы резания; P_y – радиальная составляющая силы резания;
 ξ – угол между вектором скорости и силой резания

Рассмотрим механизм формирования остаточных напряжений при свободном резании, предложенный автором работы [22]. Вначале рассмотрим формирование остаточных напряжений при резании **малопластичных материалов** для чего обратимся к рис. 1.10. На указанном рисунке выделена окружность равных напряжений, соответствующая условию $\sigma_r = \sigma_i = \sigma_t$, а значит металл, находящийся внутри этой окружности под воздействием силы $R' = \frac{R}{b}$,

будет пластиически деформирован и эти деформации останутся в нем после снятия внешней нагрузки R' . При этом глубина деформационного упрочнения поверхностного слоя будет равна h_h .

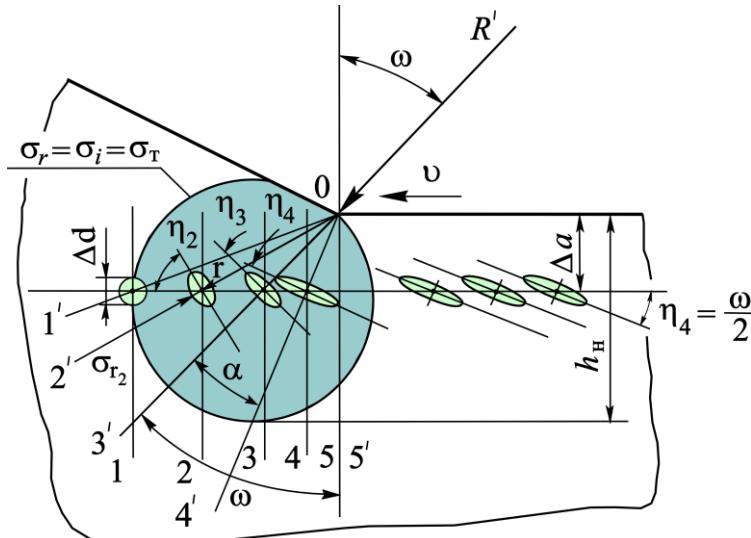


Рис. 1.10. Условная схема свободного резания малопластичных материалов [22]:
 σ_r – радиальные напряжения; σ_i – интенсивность напряжений;
 σ_t – предел текучести обрабатываемого материала

Проведем на расстоянии $\Delta a < h_h$ от обработанной поверхности прямую линию параллельную вектору скорости \vec{v} и нанесем перпендикулярно ей произвольные сечения 1 – 5. После чего через точки их пересечения проведем радиальные лучи $01' – 05'$. Будем считать, что в данных точках до момента воздействия на заготовку силы R' находятся центры элементарных окружностей диаметром Δd . Как видно из рис. 1.10, окружность с центром, располагающимся на пересечении линий $1' – 1$, находится одновременно и на

контуре, имеющем вид окружности и определяющем зону пластической деформации. Поэтому, если приложить нагрузку R' , а затем снять ее, то форма окружности диаметра Δd с центром в указанной ранее точке не изменится, т.к. эта окружность будет подвергнута только упругим деформациям. Иная картина будет иметь место с окружностями, центры которых располагаются в других точках. Так, например, если рассмотреть окружность с центром на пересечении линий $2'-2$, то она будет находиться в зоне пластической деформации, поэтому под воздействием поля напряжений в обрабатываемой заготовке изменит свою форму и преобразуется в эллипс, большая ось которого составит с вектором скорости резания угол η_2 . В последующих сечениях качественная картина пластической деформации элементарных окружностей сохранится. Однако значения угла η будут постепенно уменьшаться $\eta_2 > \eta_3 > \eta_4$, что хорошо видно из рис. 1.10.

В процессе обработки заготовки имеет место как перемещение силы R' , так и зоны пластической деформации. Поэтому выделенная частица в виде элементарной окружности попадает вначале в сечение 1, затем в сечения 2, 3 и т.д., где в результате деформации происходит преобразование ее в эллипс с постепенным увеличением большой и уменьшением малой осей за счет нарастания пластической деформации. Согласно данным автора работы [22], наибольшие деформации и, следовательно, напряже-

ния σ_r будут в сечении, для которого полярный угол $\alpha = \frac{\omega}{2}$, а это

значит, что при дальнейшем перемещении частица будет проходить области с меньшими деформациями и радиальными напряжениями. Очевидно, приобретя максимальную деформацию, частица сохранит ее и в дальнейшем. В этом случае останутся неизменными форма эллипса и угол наклона его большой оси η . Таким образом, все частицы обрабатываемого поверхностного слоя заготовки

пройдут через зону $\sigma_r = \sigma_i = \sigma_t$, в результате чего в поверхностном слое будут сформированы остаточные напряжения.

Как видно из рис. 1.10, условию $\alpha = \frac{\omega}{2}$ соответствует сечение

4, в котором угол $\eta_4 = \frac{\omega}{2}$, а это означает, что в поверхностном

слое на линии, расположенной на расстоянии Δa от поверхности, все частицы материала справа от сечения 4 будут иметь точно такие же параметры, как в этом сечении.

Итак, как отмечено в работе [22], поверхностный слой заготовки после механической обработки резанием деформационно упрочняется, а отдельные частицы материала получают остаточную деформацию. При этом угол между большой осью эллипса, совпадающей с направлением его максимального удлинения, и вектором скорости при резании, как правило, составляет

$\eta = \frac{\omega}{2} = 15^\circ \dots 25^\circ$. Возникновение остаточных пластических де-

формаций такой направленности $\eta < 45^\circ$ в поверхностном слое заготовки (см. рис. 1.10) приводит к удлинению поверхностного слоя в направлении, совпадающем с направлением вектора скорости главного движения резания. Однако нижележащие упругонапряженные слои материала, составляющие единое целое с пластически деформированным поверхностным слоем, препятствуют этому процессу. В результате поверхностный слой оказывается в состоянии остаточного сжатия, а нижележащие слои в состоянии остаточного растяжения.

Ранее была рассмотрена 2D модель деформирования материала при резании. В реальных же условиях имеет место объемное деформирование материала, т.е. частицу материала в виде элементарной окружности следует заметить на шар малого диаметра, ко-

торый при попадании в зону пластической деформации превратится в эллипсоид. В этом случае поверхностный слой заготовки будет удлиняться не только в направлении вектора скорости, но и в перпендикулярном ему направлении, т.е. в плоскости перпендикулярной плоскости схемы (см. рис. 1.10), и испытывать состояние сжатия в обоих направлениях. Направление, совпадающее с вектором скорости, принято считать окружным, а перпендикулярное ему – осевым. Эта же терминология относится и к остаточным напряжениям.

При обработке *пластичных металлических материалов*, как правило, образуется сливная стружка, прочно связанная с основным металлом. В этом случае для частиц, удаленных от вершины режущего клина и находящихся в сечениях 1 – 4 (рис. 1.11), ранее рассмотренные закономерности механизма формирования остаточных напряжений в поверхностном слое сохраняются неизменными. Однако при приближении частицы к режущей кромке (сечение 5) отделяемая от основного материала сливная стружка будет оказывать на неё деформационное воздействие. В итоге частицы материала, перемещающиеся вблизи режущей кромки инструмента, подвергнутся дополнительной пластической деформации и приобретут направление, совпадающее с текстурой стружки вблизи передней поверхности режущего клина.

Такое деформационное воздействие на частицы обработанной поверхности заготовки приведет к тому, что их максимальное удлинение будет ориентировано под углом η_5 к вектору главного движения резания, как правило, превышающим 45° [22]. В этом случае поверхностный слой будет сокращаться, а нижележащие слои материала этому препятствовать, что приведет к формированию в поверхностном слое заготовки остаточных напряжений рас-tяжения.

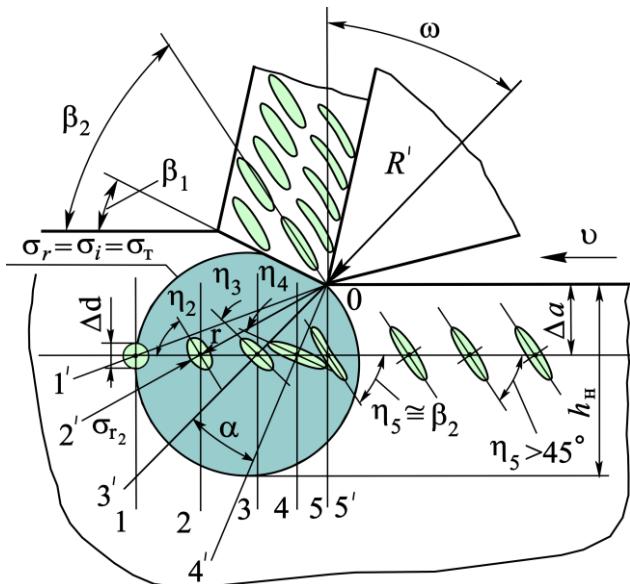


Рис. 1.11. Условная схема свободного резания пластичных материалов [22]:
 σ_r – радиальные напряжения; σ_i – интенсивность напряжений;
 σ_T – предел текучести обрабатываемого материала

При механической обработке резанием пластичных материалов дополнительное воздействие силового поля стружки может привести не только к формированию в поверхностном слое растягивающих окружных остаточных напряжений, но и осевых напряжений аналогичного знака.

Таким образом, исходя из ранее изложенного, можно утверждать, что величина угла η (см. рис. 1.10 и 1.11) определяет знак формируемых в поверхностном слое заготовки окружных остаточных напряжений. При величинах угла $\eta < 45^\circ$ следует ожидать возникновения сжимающих окружных остаточных напряжений, а при $\eta > 45^\circ$ – растягивающих. В отличие от формирования

окружных напряжений формирование осевых остаточных напряжений не связано с ориентацией большой оси эллипса у частиц материала, подвергнутых пластической деформации, относительно вектора скорости резания, а зависит исключительно от знака деформации в осевом направлении заготовки. При механической обработке резанием малопластичных материалов и образованием при этом элементной стружкой, эта деформация всегда положительная, т.е. конечный размер частицы материала больше исходного. В то же время при формообразовании резанием пластичных материалов на начальном этапе деформирования упомянутых ранее частиц материала и вплоть до сечения 4 (см. рис. 1.11) наблюдается увеличение их размера в осевом направлении. А на заключительном этапе, когда проявляется влияние на частицы напряженного поля сливной стружки, линейный размер каждой из частиц в осевом направлении уменьшается за счет их вытягивания под углом β_2 , равным среднему углу текстуры. В зависимости от силовой напряженности процесса указанный ранее размер частиц может увеличиться, и тогда сформируются сжимающие остаточные напряжения, или уменьшиться, что приведет к возникновению растягивающих остаточных напряжений.

Итак, рассмотрение механизма формирования остаточных напряжений при резании позволяет сделать заключение о том, что процессы стружкообразования и деформирования поверхностного слоя изделия взаимосвязаны. Стружкообразование и формирование поверхностного слоя являются единым процессом деформирования и разрушения материала при резании [35].

Для условий свободного резания и плоской деформации остаточные напряжения в поверхностном слое заготовок, можно рассчитать по формулам [22]:

- окружные

$$\sigma_{\tau} = - \left(\frac{C_1 R' \cos^2 \frac{\omega}{2}}{x} - \sigma_{\tau} \right) \frac{(E - E') \cos \omega}{E(1 - \mu^2)};$$

- осевые

$$\sigma_o = - \left(\frac{C_1 R' \cos^2 \frac{\omega}{2}}{x} - \sigma_{\tau} \right) \frac{\mu(E - E') \cos \omega}{E(1 - \mu^2)},$$

где $C_1 = \frac{4}{2(\pi + \beta_1) - \sin 2\omega + \sin(\omega - \beta_1)}$; $\omega = 90^\circ - \xi$; $R' = \frac{R}{b}$;

$$R = \sqrt{P_z^2 + P_y^2 + P_x^2}; \quad \xi = \arctg \frac{P_y}{P_z};$$

R – сила резания; P_z , P_y , P_x – соответственно главная, радиальная и осевая составляющие силы резани; β_1 – угол сдвига; σ_{τ} – предел текучести обрабатываемого материала; E – модуль упругости первого рода; E' – модуль упрочнения или пластичности; b – ширина среза; x – расстояние до расчетного сечения; μ – коэффициент Пуассона.

В случае несвободного резания, например, для точения эти зависимости примут вид [22]:

- для расчета окружных напряжений

$$\sigma_{\tau} = \left[\frac{C_1 R' \cos^2 \frac{\omega}{2} \cos \varphi}{x_h + r(1 - \cos \varphi)} - \sigma_{\tau} \right] \frac{E - E'}{E(1 - \mu^2)} L_t;$$

- для расчета осевых напряжений

$$\sigma_o = \left[\frac{C_1 R' \cos^2 \frac{\omega}{2} \cos \varphi}{x_h + r(1 - \cos \varphi)} - \sigma_t \right] \frac{E - E'}{E(1 - \mu^2)} L_o \cos^2 \varphi,$$

$$\text{где } L_t = \left(\sin^2 \frac{\omega}{2} - \frac{1}{2} \cos^2 \frac{\omega}{2} - \frac{\mu}{2} \right); \quad L_o = \left[\mu \left(\sin^2 \frac{\omega}{2} - \frac{1}{2} \cos^2 \frac{\omega}{2} \right) - \frac{1}{2} \right];$$

x_h – расстояние до расчетного сечения по нормали к поверхности заготовки; φ – текущий угол численно равный главному углу в плане для рассматриваемой точки режущего лезвия; r – радиус при вершине резца.

2. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ, НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ДЕТАЛЕЙ МАШИН

2.1. ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

2.1.1. ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ

Все геометрические размеры изготовленных деталей, включая линейные и угловые, должны находиться в пределах поля допуска, установленного на каждый размер. В том случае, если какой-либо размер (один или несколько) выходит за пределы поля допуска на изготовление, то деталь считается бракованной и подлежит либо утилизации, либо доработке, если брак является устранимым. Следует также отметить, что если действительные размеры несвободных поверхностей деталей будут соответствовать предельным значениям, то в этом случае возможны некоторые сложности со сборкой изделия. Поэтому целесообразно, чтобы распределение действительных размеров несвободных поверхностей деталей подчинялось закону нормального распределения. А это возможно осуществить на настроенном оборудовании при условии хорошей отлаженности и стабильности технологического процесса, когда влияние закономерно изменяющихся факторов отсутствует или проявляется незначительно. В работе [16] на основе анализа результатов многочисленных исследований установлено, что при механической обработке заготовок на металлорежущих станках по способу автоматического достижения заданных размеров их рас-

пределение подчиняется (или в достаточной мере соответствует) закону нормального распределения. Поэтому создание таких условий при производстве деталей, безусловно, будет способствовать улучшению качества деталей, сборки изделий и их надежности.

Контроль действительных размеров различных поверхностей деталей является совокупностью метрологических задач. Как правило, одну метрологическую задачу можно решить с помощью различных средств измерения, которые имеют не только разную стоимость, но также и разные точность и другие метрологические показатели, а, следовательно, дают при проведении контрольных операций неодинаковые результаты измерений. Поэтому при проведении измерений необходимо обеспечить выполнение следующего условия [39]

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_{\text{мет}} + \Delta_{\text{си}} + \Delta_o + \Delta_{\text{ycl}} \leq \delta,$$

Δ_{Σ} – суммарная погрешность измерения; $\Delta_{\text{мет}}$ – предельная погрешность метода измерения; Δ_o – погрешность оператора (контролера); Δ_{ycl} – дополнительная погрешность условий измерения; δ – допускаемая погрешность измерения.

Величина предельной погрешности средства измерения $\Delta_{\text{си}}$ определяется выбранным средством измерения, а допускаемая погрешность результатов измерения δ зависит от допуска контролируемого геометрического размера.

2.1.2. ВЛИЯНИЕ ОТКЛОНЕНИЙ ФОРМЫ

Отклонения формы поверхностей деталей машин, в том числе и деталей авиационной техники, возникают на стадии их изготовления в результате недостаточной жесткости технологической системы, включающей станок, приспособление, инструмент и деталь, деформации обрабатываемого объекта, неравномерности припуска на операции, неоднородности обрабатываемого материа-

ла и т.д. Отклонения формы контактных поверхностей приводят к снижению ряда заданных эксплуатационных свойств. Так, в подвижных соединениях эти отклонения приводят к уменьшению износостойкости деталей из-за роста удельного давления на выступах неровностей и, следовательно, ускорения износа поверхностей, к нарушению плавности хода, повышению уровня вибрации, шума и т.д. В неподвижных соединениях отклонения формы в свою очередь приводят к неравномерности натяга и удельного давления в сопряжении, к снижению прочности соединения, его герметичности, увеличению отклонения от соосности. При осуществлении процесса сборки узлов или изделий наличие отклонений формы может привести к возникновению погрешностей базирования деталей друг относительно друга, их деформациям и нарушениям условий нормальной работы собранных изделий.

На рис. 2.1 представлены результаты исследования влияния отклонений формы гильз цилиндров и поршней двигателей грузовых автомобилей ЗиЛ-130 на износ сопряжений [20]. Как видно из представленных графиков, с увеличением значений отклонений формы величина износа сопряжений увеличивается.

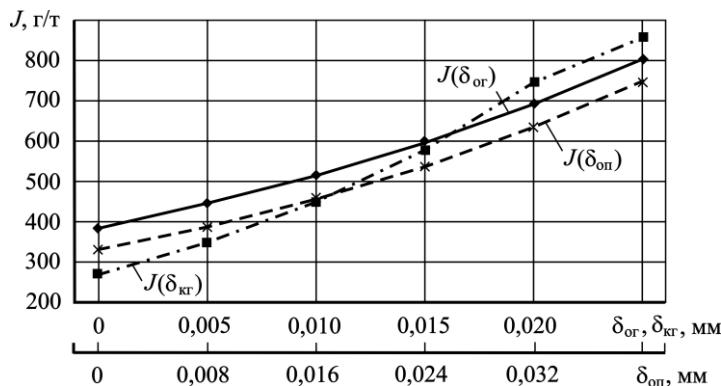


Рис. 2.1. Влияние овальности $\delta_{ог}$ и конусности $\delta_{кг}$ гильз цилиндров, овальности поршней $\delta_{он}$ на износ сопряжений J

Согласно данным работы [11], отклонения формы опорных поверхностей цапф ротора в значительной мере влияют на динамические характеристики подшипников жидкостного трения. Например, увеличение конусности поверхности цапф на величину до 10 % от поля допуска на размер приводит к увеличению амплитуды колебаний цапф ротора на 30 %. При дальнейшем увеличении конусности в ряде случаев наблюдается дестабилизация движения ротора, а именно появление автоколебаний. Наличие же эллипсности опорных поверхностей в диапазоне 5...10 % и выше от величины допуска на размер приводит к появлению дополнительной частотной составляющей в колебании ротора, равной двойной оборотной частоте. При этом рост амплитуды при увеличении эллипсности меньше, чем при увеличении конусности и составляет 10...16 %. Однако наличие частотного влияния приводит к нарушению стабильного движения ротора.

Негативное влияние отклонений формы на прочность соединений с натягом подтверждено данными работы [24]. Как следует из результатов теоретических и экспериментальных исследований этой работы, приведенных на рис. 2.2, наименьшее значение относительной прочности имеют соединения, поверхности деталей которых имеют отклонения формы в виде седлообразности. Полученные данные определены для условий нормальной (A) геометрической точности, т.е. когда точность формы может составлять 60 % от поля допуска на размер сопрягаемой поверхности. Поэтому, по мнению автора работы [24], для ответственных соединений с натягом целесообразно ввести более жесткое нормирование погрешности геометрии формы при изготовлении деталей. Для таких соединений следует устанавливать особо высокую геометрическую точность, при которой погрешность формы не должна превышать 25 % поля допуска. В этом случае снижение прочности соединений будет существенно меньше.

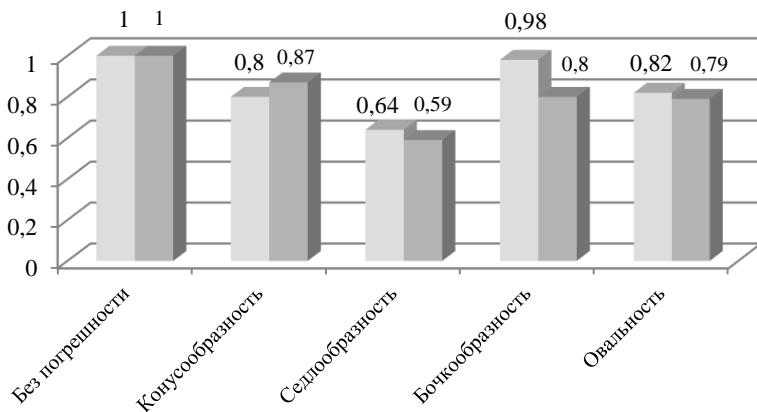


Рис. 2.2. Сравнительные результаты относительной теоретической и экспериментальной прочности на осевой сдвиг соединений, имеющих различные отклонения формы деталей:
■ – данные расчета; ■ – экспериментальные данные

2.1.3. ВЛИЯНИЕ ВОЛНИСТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ

Волнистость поверхности, как уже отмечалось ранее, занимает промежуточное положение между макроотклонениями формы и шероховатостью поверхности и оказывает влияние на эксплуатационные характеристики деталей, а также работоспособность и надежность изделий. Особенно это относится к деталям изделий авиационной техники, работающих в условиях знакопеременных нагрузок и достаточно часто высоких температур. Из-за наличия волнистости на контактных поверхностях деталей могут иметь место, как неравномерный износ, так и рост удельного давления в зонах контакта. А это в свою очередь приводит к последствиям аналогичным тем, что наблюдаются при отклонениях формы (см. п. 2.1.2).

Шероховатость и волнистость поверхности весьма сильно влияют на контактную жесткость стыков сопрягаемых деталей.

Уменьшая их значения на контактных поверхностях путем тонкого шлифования, суперфиниша, шабрения, доводки и т.д. можно существенно нарастить несущую способность соединений за счет увеличения фактической площади контакта до 80...90 % и тем самым увеличить их контактную жесткость.

Как отмечено в работе [45], контактная жесткость оказывается на точности: работы приборов, установки деталей в станочных приспособлениях, обработки и сборки. То есть на качестве изделий различных отраслей промышленности, в том числе и авиационной. В этой же работе сделан акцент на то, что при первом нагружении контактирующих поверхностей деталей существенный процент варьирования контактной жесткости приходится на поверхностную микротвердость, тогда как при повторных нагрузлениях контактная жесткость в основном определяется высотными параметрами профиля шероховатости R_a , R_p и профиля волнистости W_p , W_c . При повторных нагрузлениях параметры волнистости W_p и W_c оказывают большее влияние на контактные перемещения, чем при первом нагружении деталей.

В работе [47] на основе анализа полученной зависимости авторами дана оценка нормальной контактной жесткости плоского стыка при наличии на поверхностях деталей волнистости и шероховатости. Численный эксперимент показал, что жесткость волнистой поверхности примерно в 30 раз больше жесткости шерохованного слоя.

В процессе трения и изнашивания сопрягаемых поверхностей деталей в подвижных соединениях изделий наблюдается постепенное уменьшение отклонений формы и волнистости, рост фактической площади контакта за счет вступления в работу новых участков поверхностей, достаточно часто имеющих иные физико-механические характеристики, и снижение удельного давления в зонах контакта. В результате этого происходит постепенное

снижение интенсивности изнашивания поверхностей. Как отмечено в работе [33], только после полной стабилизации отклонений формы, волнистости, шероховатости и физико-механических характеристик поверхностного слоя завершается процесс приработки деталей.

Волнистость поверхности наряду с отклонениями формы и шероховатостью снижает прочность соединений с натягом. А, как известно, под прочностью соединений с натягом понимают их способность передавать заданные значения крутящего момента и осевой силы без взаимного смещения деталей друг относительно друга. А.Г. Сусловым в работе [45] приведены расчетные зависимости для определения прочности посадок с учетом геометрических параметров сопрягаемых поверхностей деталей:

$$M = \frac{\pi d l f_{kp} \{ \Delta - 0,5[H \max_1 + H \max_2 + Wz_1 + Wz_2 + 5(Ra_1 + Ra_2)] \}}{\left[\left(\frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2} \right) + \mu_1 \right] \cdot \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \cdot 2 \cdot 10^3};$$

$$P = \frac{\pi d l f_{oc} \{ \Delta - 0,5[H \max_1 + H \max_2 + Wz_1 + Wz_2 + 5(Ra_1 + Ra_2)] \}}{\left[\left(\frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2} \right) + \mu_1 \right] \cdot \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \cdot 2 \cdot 10^3},$$

где M – передаваемый крутящий момент; P – передаваемая осевая сила; d – диаметр сопряжения деталей; D – наружный диаметр втулки; l – длина сопряжения деталей; f_{kp} и f_{oc} – коэффициенты трения соответственно при кручении и осевом сдвиге; Δ – натяг в соединении сопрягаемых деталей; E – модуль продольной упругости материала при растяжении; μ – коэффициент Пуассона;

H_{\max} – наибольшее отклонение формы поверхности (в формулах индекс «1» относится к валу, индекс «2» – к втулке).

Следует отметить, что после финишных методов обработки при достижении заданных требований к шероховатости поверхности не всегда гарантированно обеспечиваются требуемые параметры к её волнистости. Авторами работы [28] на примере обработки корпусов гидроусилителей из высокопрочного чугуна марки ВЧ-50 установлено, что применение процесса пневмоцентробежного полирования (ПЦП) после операции чернового хонингования позволяет существенно улучшить параметры шероховатости и волнистости (табл. 2.1) и обеспечить тем самым повышение работоспособности и надежности изделий.

Таблица 2.1. Геометрические параметры посадочных мест корпусов гидроусилителей из чугуна марки ВЧ-50 после различных видов финишной обработки поверхностным пластическим деформированием [28]

Виды финишной обработки	Параметры шероховатости			Параметры волнистости		
	R_a , мкм	RSm , мкм	Rc , мкм	Wa , мкм	WSm , мкм	Wc , мкм
Хонингование черновое	1,5…1,6	105,0	5,566	1,8…1,9	2310,0	6,034
Алмазное выглаживание	0,3…0,4	104,5	1,616	0,7…0,75	2520,0	3,245
Раскатывание жестким широким раскатником	0,20…0,25	153,6	1,252	0,55…0,6	1845,0	1,614
Раскатывание инструментом для ПЦП	0,20…0,25	149,8	1,199	0,3…0,35	2101,7	1,041

2.1.4. ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ

Шероховатость поверхности является геометрическим параметром, который в значительной мере влияет на контактную жесткость соединений, износостойкость поверхности, герметичность

соединений, сопротивление усталости, малоцикловую усталость и ударную прочность.

О влиянии шероховатости поверхности деталей на контактную жесткость соединений в совокупности с волнистостью изложено в п. 2.1.3. При этом следует иметь в виду, что ГОСТ Р ИСО 4287-2014 [62] вступил в действие с 1 января 2016 г., поэтому в работах, опубликованных до этой даты, использовался в основном ГОСТ 2789-73, который, как уже отмечалось ранее, действует и в настоящее время.

Как известно, износостойкость поверхностей существенно зависит от условий трения (сухое, полусухое, жидкостное), величины приложенных нагрузок, физико-химических характеристик материала, профиля шероховатости и параметров, которыми он характеризуется, направления микронеровностей, а также степени изменения профиля и параметров в процессе работы.

В процессе приработки деталей, т.е. во время начального износа, наблюдается изменение профиля шероховатости, а также направления обработочных рисок. При этом высота микронеровностей либо уменьшается, либо увеличивается, достигая некоторого оптимального значения, зависящего от условий трения. В том случае, если в процессе изготовления сопрягаемых деталей удается получить поверхности с шероховатостью, соответствующей оптимальной для заданных условий трения или близкой к ней, то во время приработки износ и коэффициент трения k_{tp} оказываются наименьшими. Поэтому при проектировании деталей машин конструктору следует учитывать условия трения и назначать оптимальные значения шероховатости поверхности.

Ранее изложенное в полной мере подтверждают приведенные на рис. 2.3 зависимости величины износа от высоты микронеровностей, полученные проф. П.Е. Дьяченко, которые носят экстремальный характер с минимумом в точках O_1 и O_2 .

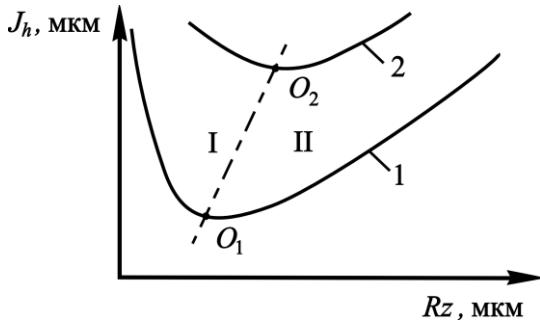


Рис. 2.3. Зависимости износа от высоты микронеровностей, выраженной через параметр Rz , при менее тяжелых (1) и более тяжелых (2) условиях работы [26]

Соединив точки O_1 и O_2 на кривых 1 и 2 (см. рис. 2.3) линией условно получим две зоны I и II. Увеличение высоты микронеровностей в зоне I до значений, определяемых линией O_1O_2 , приводит к снижению износа. Это, по-видимому, связано с тем, что на плотно соприкасающихся поверхностях с незначительной шероховатостью наблюдаются адгезионные процессы, сопровождающиеся разрушением возникших связей и вырыванием частиц металла, т.е. в зоне I имеет место адгезионное трение. Кроме того, при малых значениях шероховатости наблюдается также плохая смачиваемость сопряженных поверхностей и выдавливание смазки из зоны контакта. В зоне II с большими значениями микронеровностей по сравнению с оптимальными износ увеличивается. Это, как отмечено в работе [26], обусловлено возрастанием механического зацепления микровыступов и их последующим срезом или скальванием. Таким образом, для зоны II характерно деформационное трение. При более тяжелых условиях трения износ сопрягаемых деталей в меньшей степени зависит от шероховатости поверхности (см. рис. 2.3). В этом случае, кривая износа 2 смещается вправо и вверх по сравнению с кривой износа 1, а оптимальное значение

шероховатости по параметру Rz в точке O_2 существенно больше, чем в точке O_1 . Аналогично изменяется и коэффициент трения.

Экспериментальными исследованиями установлено, что на износстойкость деталей помимо параметров шероховатости оказывает влияние и направление микронеровностей. Причем влияние направления микронеровностей неоднозначно в зависимости от условий трения. Так, в условиях жидкостного трения при малых значениях параметров шероховатости Ra и Rz на сопрягаемых деталях направление микронеровностей на процесс изнашивания влияние практически не оказывает. Вместе с тем с ростом значений Ra и Rz более выгодным направлением неровностей с точки зрения снижения изнашивания является направление параллельное вектору скорости.

В условиях граничного трения сопрягаемых поверхностей с малыми величинами микронеровностей и их направлением, совпадающим с направлением скорости движения, возникающие схватывание и износ будут больше, чем при перпендикулярном направлении. В то же время при больших высотных параметрах шероховатости, когда адгезионного схватывания не наблюдается, параллельное направление неровностей дает наименьший износ. Что касается коэффициента трения, то он будет иметь наибольшее значение при сочетании контактных поверхностей с одинаковым направлением неровностей и их расположением перпендикулярно направлению движения. При взаимно перпендикулярном направлении неровностей у трущихся поверхностей или при беспорядочном их расположении коэффициент трения будет минимальным [26].

Герметичность подвижных соединений может быть достигнута за счет обеспечения минимальных зазоров в сопряжении деталей и сохранения этих зазоров в процессе последующей эксплуатации изделий. А минимальные зазоры, в свою очередь, могут быть обеспечены при уменьшении высотных параметров шероховатости Ra , Rz , $Rmax$ и увеличении параметра tp . Для грубых поверхностей

микровпадины на профиле шероховатости поверхности исполняют роль лабиринтного уплотнения, поэтому повышению герметичности неподвижных соединений может способствовать увеличение параметров Ra , S , Sm и уменьшение параметра tp [29].

Сопротивление усталости и ударная вязкость являются эксплуатационными характеристиками, которые оцениваются при воздействии динамических нагрузок на детали. На эти характеристики существенное влияние оказывает шероховатость поверхности деталей, причем главным образом через концентрацию напряжений на дне впадин микронеровностей.

Сопротивление усталости – это свойство материала противостоять усталости, а усталость, в свою очередь, это процесс постепенного накопления повреждений материала под действием переменных напряжений, приводящий к изменению свойств, образованию трещин, их развитию и разрушению материала. Одной из характеристик сопротивления усталости является предел выносливости при симметричном цикле нагружения. Впадины микронеровностей на поверхности объектов по сути дела исполняют роль концентраторов напряжений, а, как известно, предел выносливости гладких образцов σ_{-1} связан с пределом выносливости образцов с концентратором напряжений σ_{-IK} следующей зависимостью [44]

$$\sigma_{-IK} = \frac{\sigma_{-1}}{K_\sigma},$$

где $K_\sigma = 1 + g_\sigma(\alpha_\sigma - 1)$ – эффективный коэффициент концентрации напряжений; g_σ – коэффициент чувствительности металла к концентрации напряжений; α_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений (по Г. Нейберу).

Для образцов из углеродистых сталей, имеющих незначительные радиусы кривизны r на дне впадин микронеровностей, коэф-

фициент g_σ принимают равным 0,1...0,2, в то время как для легированных сталей он будет иметь большие значения.

Расчетные зависимости для определения коэффициента α_σ зависят от условий нагружения и имеют следующий вид [43, 44]:

- при кручении и сдвиге

$$\alpha_\sigma = 1 + \sqrt{\gamma \frac{Rz}{r}} ;$$

- при растяжении и изгибе

$$\alpha_\sigma = 1 + \sqrt{\gamma \frac{Rz}{r}} ,$$

где γ – коэффициент разгрузки, зависящий от отношения шага неровностей к их высоте (рис. 2.4).

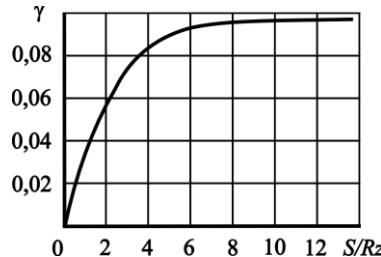


Рис. 2.4. Зависимость коэффициента разгрузки γ от отношения параметров шероховатости S к Rz [44]

Исследованиями установлено, что для титановых сплавов, коррозионно-стойких сталей мартенситного и аустенитного классов и жаростойких никелевых сплавов, применяемых, например, при производстве деталей современных газотурбинных двигателей (ГТД), коэффициент K_σ имеет большие значения по сравнению с углеродистыми сталью. Это обусловлено их повышенной чувствительностью к концентрации напряжений [31].

Результаты исследования влияния шероховатости поверхности на предел выносливости образцов их жаропрочных сплавов XH70BMTЮ и XH56BMКЮ, применяемых для изготовления рабочих лопаток газовых турбин, представленные в виде зависимостей в логарифмических координатах, приведены на рис. 2.5.

Как видно из данного рисунка, при значениях параметра шероховатости Ra 0,15; Ra 0,3; Ra 1,2; Ra 5,0 мкм и направлении неровностей перпендикулярном оси образцов предел выносливости при симметричном цикле нагружения снижается соответственно на 6...12; 7...16,5; 10,5...23; 13...33 % по сравнению с пределом выносливости образцов без физико-химических изменений в сплавах и шероховатостью поверхности $Ra \approx 0,01$ мкм.

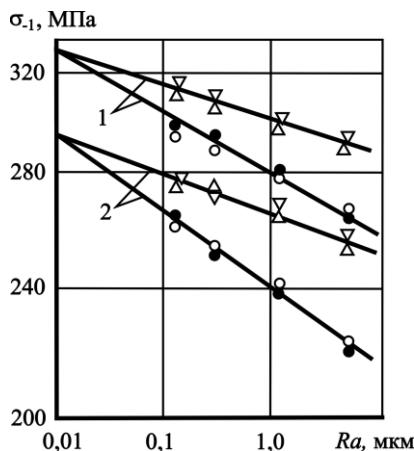


Рис. 2.5. Изменение предела выносливости в зависимости от шероховатости поверхности сплавов XH70BMTЮ (1) и XH56BMКЮ (2) [44]:

- шлифование методами: продольной подачи кругом (∇) и лентой (Δ); поперечной подачи кругом (\circ) и лентой (\bullet);
- условия испытаний: 800 °C, частота нагружения 1 кГц (1); 900 °C, частота нагружения 5 кГц (2); база испытаний $1 \cdot 10^8$ циклов

На рис. 2.6 представлен график изменения предела выносливости закаленных образцов из сложнолегированной жаропрочной стали аустенитного класса 45Х14Н14В2М (ЭИ69) в зависимости от шероховатости поверхности, полученный акад. АН УССР С.В. Серенсеном. Указанный материал применяется для изготовления клапанов двигателей, в том числе клапанов выпуска авиадвигателей, деталей арматуры и трубопроводов, деталей дизелей и специального крепежа. Испытание образцов осуществлялось при чистом изгибе с вращением. Если предел выносливости образцов при шероховатости поверхности $Rz = 0,2$ мкм принять за 100 %, то при высоте микронеровностей образцов $Rz = 1,6\dots 3,2$ мкм он составляет примерно 75 %.

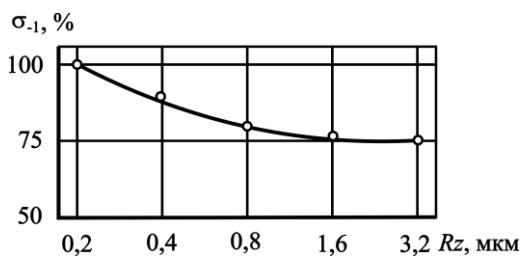


Рис. 2.6. Зависимость предела выносливости образцов из стали 45Х14Н14В2М в зависимости от шероховатости поверхности

На сопротивление усталости материалов значительное влияние оказывает также направление микронеровностей. Так, например, у образцов из конструкционных материалов с направлением микронеровностей вдоль их оси сопротивление усталости в 1,5 раза больше, чем у образцов с направлением неровностей перпендикулярно оси.

Как показал анализ научной литературы, чаще всего исследуется влияние шероховатости поверхности образцов либо деталей на пределы неограниченной выносливости при циклической дол-

говечности 10^7 и более. Вместе с тем установленная рядом производителей продукции циклическая долговечность многих деталей и изделий, таких как шасси самолетов, стволы стрелкового и артиллерийского оружия, относящихся к деталям импульсных тепловых машин, кузнечных штампов и энергетического оборудования существенно меньше, указанных ранее значений. Поэтому в этом случае образцы или детали из исследуемых материалов целесообразно испытывать на малоцикловую усталость.

На рис. 2.7 приведены результаты испытаний на малоцикловую усталость плоских образцов, имеющих различные значения шероховатости поверхности. Образцы изготавливались из стали 4Х5МФС, применяемой для изготовления штампов. Этalonным ($Rz = 2$ мкм) и шероховатым ($Rz = 30$ мкм) образцам задавали соответственно амплитуды напряжений σ_{a_3} , $\sigma_{a_{ш}}$ и фиксировали числа циклов нагружения N_t (циклическую долговечность) до образования трещин размером 0,8...1 мм. Текущие значения циклов нагружения изменялись в диапазоне от $3 \cdot 10^2$ до 10^5 .

Из представленных на рис. 2.7 данных видно, что с увеличением высотного параметра шероховатости поверхности Rz наблюдается существенное снижение пределов ограниченной выносливости как при нормальной (20 °C), так и повышенной (450 °C) температурах. Предел ограниченной выносливости и циклическая долговечность также являются характеристиками сопротивления усталости.

Ударная вязкость – это способность материала поглощать механическую энергию в процессе деформации и разрушения под действием ударной нагрузки [40]. Этот эксплуатационный параметр также зависит от шероховатости поверхности. По данным А.А. Маталина [26] снижение шероховатости поверхности образцов из сталей 3 и 5 с $Rz = 300$ мкм до $Rz = 0,4$ мкм приводит к увеличению ударной вязкости соответственно в 1,36 и 1,7 раза.

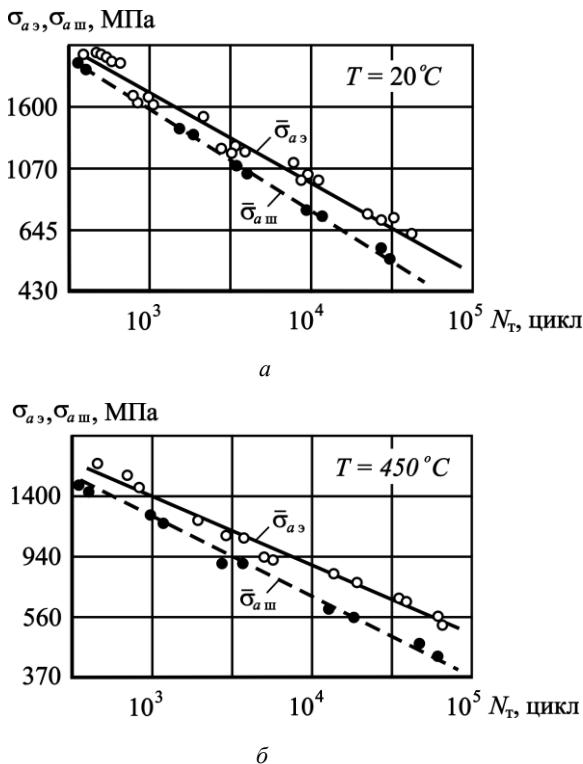


Рис. 2.7. Кривые усталости плоских образцов из стали 4Х5МФС с различной шероховатостью поверхности, окончательно обработанных шлифованием ($Rz = 2 \text{ мкм}$) и фрезерованием ($Rz = 30 \text{ мкм}$), при комнатной (а) и повышенной (450 °C) (б) температурах [13]:
 ○ – шлифование; ● – фрезерование

Существенное влияние шероховатость поверхности оказывает и на коррозионную стойкость деталей. Как правило, увеличение шероховатости поверхности способствует интенсификации процесса коррозии. Это обусловлено, с одной стороны, увеличением реальной площади корродирующей поверхности, а, с другой стороны, возрастанием электрохимической неоднородности поверхностного слоя. В условиях газовой коррозии, которая, например,

имеет место в газодинамических трактах ГТД, во впадинах накапливаются агрессивные примеси, присутствующие в газовом потоке, такие как хлориды и сульфиды металлов, ускоряющие процесс коррозии. Следует также отметить, что защитные окисные пленки, наносимые на рабочие поверхности лопаток, в большей мере склонны к растрескиванию на поверхностях с более грубой исходной шероховатостью.

2.2. ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ

2.2.1. ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ

Деформационное упрочнение (наклеп) – это изменение структуры и свойств металлов и сплавов в результате пластической деформации [40]. Наклеп влияет на многие эксплуатационные характеристики деталей машин и авиационной техники. Причем это влияние носит не только сложный, а порой даже и прямо противоположный характер и зависит от уровня параметров деформационного упрочнения, условий эксплуатации, т.е. среды и температуры, и взаимосвязи с другими параметрами поверхностного слоя, а именно: шероховатостью, остаточными напряжениями, поверхностными дефектами и т.д. [29, 43].

Наклеп поверхностного слоя оказывает значительное влияние на контактную деформацию деталей в сборочной единице за счет снижения её пластической составляющей. А это в свою очередь обеспечивает повышение контактной жесткости и надежности в неподвижных соединениях. В наклепанном слое деталей замедляются протекание процесса выкрашивания и образование питтингов, т.е. углублений (ямок) на поверхности и полостей внутри металлов (сплавов). Кроме того, повышается контактная выносливость деталей. Так, согласно данным работы [3], повышение

в 1,5...2 раза микротвердости опор буровых долот и резьбовых соединений бурильных труб за счет деформационно-электрохимической обработки поверхностей трения позволило снизить интенсивность изнашивания и повысить контактную выносливость соответственно на 33...53 и 54 %.

Снижение интенсивности изнашивания деталей при наклееце связано, во-первых, с деформированием микронеровностей их контактных поверхностей и уменьшением их взаимного внедрения, а, во-вторых, с повышением твердости поверхностей. По утверждению автора работы [26], при наклееце увеличивается диффузия атмосферного кислорода в поверхностной слой деталей, что приводит к образованию твердых окисных пленок, препятствующих пластической деформации трущихся контактных поверхностей и адгезионному износу. Наибольшее влияние наклееце оказывает на износ в период приработки. По достижении для заданных условий трения оптимальных значений шероховатости поверхности и микротвердости износ стабилизируется.

Как уже отмечалось ранее, одной из характеристик сопротивления усталости деталей является предел выносливости. Этот параметр зависит от упрочнения (наклееца) поверхностного слоя деталей, происходящего при определенных условиях на операциях механической обработки в процессе их изготовления. При этом упрочнение металла поверхностного слоя до определенных значений, индивидуальных для каждой марки материала, способствует предотвращению возникновения микродефектов, являющихся источником зарождения усталостных трещин. Кроме того, при оптимальных значениях наклееца уменьшается также амплитуда циклических пластических деформаций, что благоприятно сказывается на увеличении предела выносливости [26].

Это утверждение подтверждают результаты исследования, приведенные на рис. 2.8 и показывающие влияние величины наклееца по-

верхностного слоя образцов из различных материалов после комбинированной электрохимикомеханической обработки на предел их выносливости при температурах до 400 К. Комбинированная обработка образцов включала в себя анодное растворение материала и механическое упрочнение. Испытания образцов выполнялись при чистом изгибе с кручением при базовом количестве циклов: для сталей и сплавов – $2 \cdot 10^7$; для титановых сплавов – $5 \cdot 10^7$.

Процессы комбинированной электрохимикомеханической обработки в настоящее время успешно используются в оборонной, авиационной и ракетно-космической отраслях промышленности при производстве транспортных средств, компрессоров, насосов и изделий специального назначения [4].

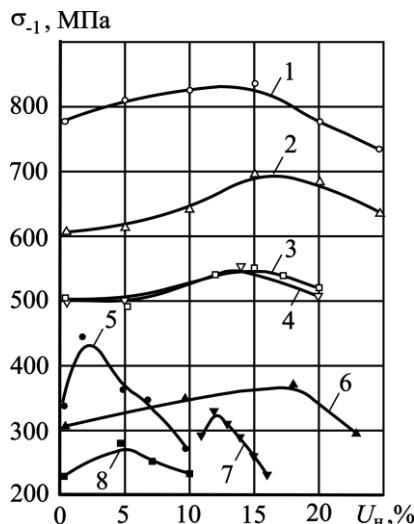


Рис. 2.8. Влияние величины наклена поверхности слоя образцов из различных материалов на предел их выносливости [5]:
 1 – сталь 12Х2Н4А; 2 – сталь 40ХНМА; 3 – сталь 45; 4 – сталь 40Х;
 5 – жаропрочный сплав ХН70МВТЮ; 6 – титановый сплав ВТ9;
 7 – титановый сплав ВТ3-1; 8 – жаропрочный литейный сплав ЖС6-К

Из анализа зависимостей (см. рис. 2.8), полученных А.И. Болдыревым [5], следует, что для всех исследуемых материалов предел выносливости при симметричном цикле нагружения растет до некоторого предельного, характерного для каждого материала, значения. При дальнейшем повышении степени наклена имеет место снижение предела выносливости, т.е. для каждого материала имеется оптимальное значение наклена, при котором предел выносливости достигает наибольшего значения. Как видно из рис. 2.8, оптимальные значения наклена для исследуемых материалов имеют следующие значения: для сталей 12Х2Н4А – 13 %; 40ХНМА – 16,5 %; 45 – 15 %; 40Х – 13 %; сплава ХН70МВТЮ – 2,5 %; титановых сплавов: ВТ9 – 17,5 %; ВТ3-1 – 12 %; сплава ЖС6-К – 5,5 %.

По данным Ю.Р. Копылова [19], при увеличении степени пластической деформации при сплошном наклете и температуре, близкой к нормальной, сопротивление усталости углеродистых и легированных сталей возрастает.

Влияние же наклена на сопротивление усталости металлов при высоких температурах более сложное, о чем свидетельствует анализ литературы, приведенный в работе [42]. Как следует из данного анализа предварительная холодная деформация растяжением жаропрочной стали аустенитного класса 1Х14Н14В2М (ЭИ257) на 5 и 13 % позволяет повысить её сопротивление усталости при температуре 600 °С соответственно на 19,2 и 11,5 % по сравнению со сталью, не подвергнутой этому процессу. А наклеп от деформации растяжением на 13 % высоколегированной жаропрочной стали 45Х14НМВ2М (ЭИ69) снижает сопротивление усталости на 7,5 %.

Поверхностный наклеп после обкатки роликами повышает сопротивление усталости аустенитных сталей ЭИ123, 10Х16Н25АМ6 (ЭИ395) и 08Х16Н13М2Б (ЭИ405) при температу-

ре нагрева 600...750 °С на 11...33 %, а влияние его после такого же упрочнения на сопротивление усталости сплава ЭИ437Б при температурах испытания 700 и 800 °С зависит от базы испытания.

Авторы работы [18] также как и автор работы [5] считают, что сопротивление усталости материалов при увеличении степени наклена в процессе упрочнения – растет, достигая некоторого предельного для данного материала значения. Дальнейшее же упрочнение ведет к снижению данного эксплуатационного параметра за счет перенаклена. На основании данных экспериментальных исследований авторами работы [18] получена эмпирическая зависимость, связывающая предел выносливости при симметричном цикле нагружения со степенью наклена U_h :

$$\sigma_{-1} = 3,75U_h^4 - 42,5U_h^3 + 151U_h^2 - 172U_h + 264.$$

Наклен поверхностного слоя деталей, изготовленных из жаропрочных сплавов посредством обработки лезвийным и абразивным инструментом, приводит к снижению предела выносливости. Это обусловлено тем, что при рабочих температурах степень наклена поверхностного слоя указанных деталей будет превышать оптимальное значение. С увеличением глубины и степени деформационного упрочнения, а также базы испытания влияние поверхностного наклена на предел выносливости возрастает, что видно из рис. 2.9. Так, согласно данным работы [44], для сплавов ХН70ВМТЮ (ЭИ617), ХН70ВМТЮФ (ЭИ826) и ХН55ВМТФКЮ (ЭИ929), предназначенных для изготовления лопаток газовых турбин, с увеличением глубины наклена с 15 до 160 мкм после процессов фрезерования, шлифования и обкатывания роликом предел выносливости при симметричном цикле нагружения на базе 10^6 циклов в среднем уменьшается на 3...7 %, а на базе 10^8 – на 5...17 %.

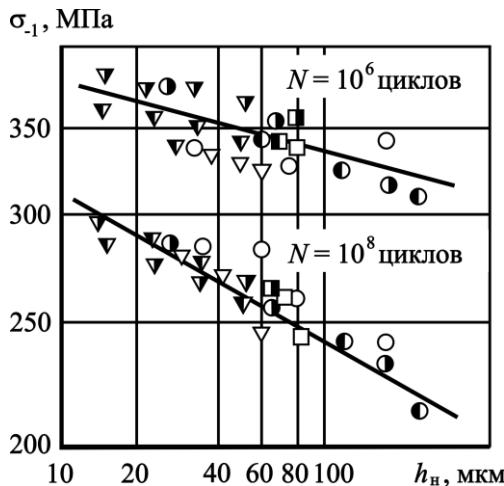


Рис. 2.9. Изменение сопротивления усталости жаропрочных сплавов в зависимости от глубины наклена после фрезерования (□), шлифования (▽) и обкатки роликом (○) [43, 44]:
 □, ▽, ○ – сплав XH70ВМТЮ; ■, ▼, ● – сплав XH70ВМТЮФ;
 ■, ▼, ● – сплав XH55ВМТФКЮ; условия испытаний:
 температура нагрева 800 °С (сплавы XH70ВМТЮ и XH70ВМТЮФ)
 и 900 °С (сплав XH55ВМТФКЮ); частота нагружения 5 кГц

Повышение влияния поверхностного наклена на предел выносливости деталей (образцов), работающих при высоких температурах, с увеличением базового числа циклов испытаний по всей видимости обусловлено интенсификацией диффузионных процессов, вызывающих разупрочнение пластически деформированного поверхностного слоя за счет увеличения продолжительности по времени термического и механического воздействия. Поэтому для повышения сопротивления усталости таких деталей, в частности предела выносливости, следует наиболее пластически деформированные слои, сформированные на операциях лезвийной и абразивной обработки при их изготовлении, удалять посредством различ-

ных методов электрохимической обработки. При этом следует учитывать конструктивные особенности деталей. Для устранения поверхностного наклена могут использоваться также термические процессы.

Коррозионная стойкость деталей после их упрочнения на операциях механической обработки, как правило, снижается. Это, по-видимому, связано с тем, что неодинаковая ориентация и состав зерен приводят к различной степени их упрочнения, неравномерному распределению энергии и, как результат, изменению электродного потенциала. Более накледанные зерна становятся анодами, менее накледанные катодами. В результате при наличии соответствующей среды происходит электрохимический процесс.

2.2.2. ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

В соответствии с классификацией, предложенной акад. АН СССР Н.Н. Давиденковым, различают следующие разновидности остаточных напряжений:

- напряжения 1-го рода (макронапряжения), охватывающие области соизмеримые с размерами детали и уравновешивающиеся в пределах этих областей, их еще называют технологическими остаточными напряжениями. При рассмотрении этих напряжений допустимо считать материал изотропным;

- напряжения 2-го рода (микронапряжения), которые формируются в микрообъемах и распространяются на отдельные зерна, группы зерен или блоки и связаны с анизотропией кристаллов, пространственной ориентацией кристаллографических плоскостей, наличием тех или иных фаз и т.д.;

- напряжения 3-го рода, формирующиеся в субмикрообъемах и приводящие к смещению атомов из узлов решеток.

В дальнейшем речь будет идти об остаточных макронапряжениях или технологических остаточных напряжениях.

В зависимости от формы детали и траектории движения режущего или деформирующего инструмента макронапряжения подразделяются на три вида: окружные σ_t , действующие в направлении вектора скорости главного движения резания или пластического деформирования; осевые σ_o , действующие перпендикулярно вектору скорости, т.е. в направлении вектора движения подачи; радиальные σ_r , действующие в направлении нормальном к обработанной поверхности.

Наиболее сильное влияние на сопротивление усталости деталей оказывают деформационное упрочнение (наклеп) и остаточные напряжения [22]. При этом следует отметить, что деформационное упрочнение и остаточные напряжения взаимосвязаны и действуют одновременно, но имеют свою специфику. В настоящее время на основе многочисленных экспериментальных исследований установлено, что сжимающие остаточные напряжения повышают предел выносливости образцов и деталей, а растягивающие снижают. Связь между пределом выносливости при симметричном цикле нагружения и остаточными напряжениями может быть описана зависимостью, представленной в работе [22]

$$\sigma_{-1} = \sigma_{-1\text{исх}} - c\sigma_{\text{oct,max}},$$

где $\sigma_{-1\text{исх}}$ – предел выносливости исходного (полированного) образца без остаточных напряжений; $\sigma_{\text{oct,max}}$ – значения максимальных остаточных напряжений; c – постоянный коэффициент, величина которого зависит от условий обработки и изменяется в диапазоне 0,1...0,3.

Из данной формулы следует, что при увеличении сжимающих остаточных напряжений наблюдается рост сопротивления устало-

сти деталей и образцов, при увеличении растягивающих остаточных напряжений сопротивление усталости – уменьшается.

В качестве подтверждения ранее изложенного на рис. 2.10 и 2.11 представлены результаты влияния остаточных напряжений на предел выносливости образцов из жаропрочных титанового сплава ВТ9 и сплава ЭИ787-ВД после их упрочнения на пневмодробеструйной установке металлическими из сплава ЖС6У и стеклянными микрошариками. Титановый сплав ВТ9 применяется для изготовления статорных и роторных лопаток компрессора низкого давления, статорных лопаток компрессора высокого давления, дисков компрессора низкого и высокого давления, а также корпусных деталей агрегатов ГТД [12]. Жаропрочных сплав ЭИ787-ВД нашел применение для изготовления лопаток компрессора и турбины, дисков, дефлекторов и колец ГТД.

Как описано в работе [6], для проведения экспериментальных исследований было изготовлено по четыре партии плоских образцов из материалов, указанных ранее. Предварительная обработка включала фрезерование и шлифование, а окончательная обработка каждой партии образцов осуществлялась при следующих методах и условиях:

- партия №1 – полирование;
- партия №2 – упрочнение металлическими микрошариками диаметром 0,2...0,315 мм при давлении воздушной среды $P = 0,2$ МПа в течение 6 минут;
- партия №3 – упрочнение стеклянными микрошариками диаметром 0,05...0,15 мм при давлении воздушной среды $P = 0,3$ МПа в течение 9 минут;
- партия №4 – упрочнение стеклянными микрошариками диаметром 0,05...0,15 мм при давлении воздушной среды $P = 0,35$ МПа в течение 9 минут.

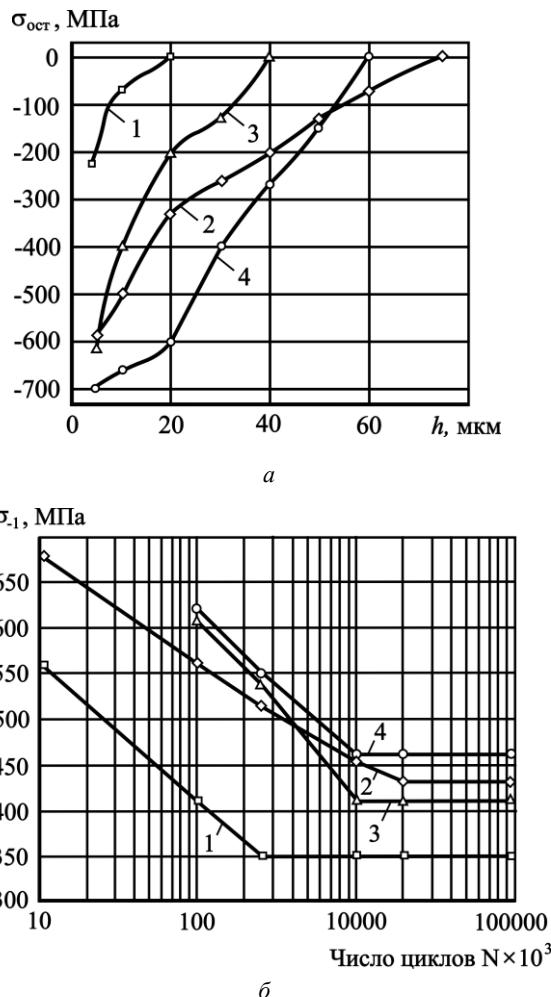
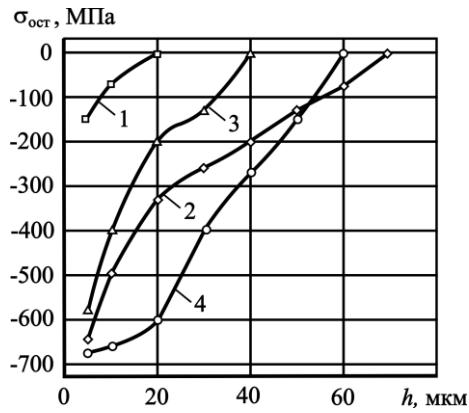
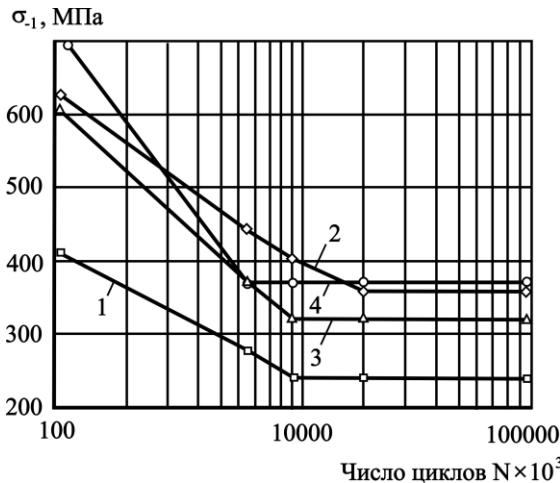


Рис. 2.10. Распределение остаточных напряжений по глубине в образцах из сплава ВТ9 (а) и кривые выносливости данных образцов (б) [6]:

1 – после полирования; 2 – после упрочнения металлическими микрошариками; 3 – после упрочнения стеклянными микрошариками, $P = 0,3 \text{ МПа}$; 4 – после упрочнения стеклянными микрошариками, $P = 0,35 \text{ МПа}$



a



b

Рис. 2.11. Распределение остаточных напряжений по глубине в образцах из жаропрочного сплава ЭИ787-ВД (а) и кривые выносливости данных образцов (б) [6]:
 1 – после полирования; 2 – после упрочнения металлическими микрощариками; 3 – после упрочнения стеклянными микрощариками, $P = 0,3$ МПа; 4 – после упрочнения стеклянными микрощариками, $P = 0,35$ МПа

Определение предела выносливости при симметричном цикле нагружения всех партий образцов осуществлялось на базе $2 \cdot 10^7$ циклов при температуре 20°C по ускоренной методике. За предел выносливости принималось напряжение, которое выдерживали заданную базу испытаний без разрушения не менее трех образцов.

Из рис. 2.10, *a* и 2.11, *a* видно, что в поверхностном слое образцов формируются сжимающие остаточные напряжения. При этом максимальные величины остаточных напряжений у образцов, подвергнутых дробеструйному упрочнению, в 3...4 раза больше, чем у полированных образцов и составляют $\sigma_{\text{ост}} = -(600\dots 700)$ МПа. При упрочнении металлическими микрошариками глубина распространения сжимающих остаточных напряжений, сформированных в поверхностном слое образцов, достигает 0,07...0,075 мм, а при упрочнении стеклянными микрошариками при давлениях $P = 0,3$ МПа и $P = 0,35$ МПа составляет соответственно 0,04 и 0,06 мм. Следует также отметить, что эпюры распределения сжимающих остаточных напряжений у образцов из титанового сплава ВТ9 и сплава ЭИ787-ВД имеют примерно одинаковый характер.

Как видно из рис. 2.10, *б* и 2.11, *б*, упрочнение поверхности образцов металлическими и стеклянными микрошариками позволило существенно повысить их сопротивление усталости по сравнению с полированными образцами. Так, упрочнение образцов из сплава ВТ9 металлическими микрошариками за счет увеличения степени наклена до 14 % и сжимающих остаточных напряжений до -600 МПа позволило повысить предел выносливость на 23 %. Для сплава ЭИ787-ВД увеличение предела выносливости составило 32 % при увеличении степени наклена до 13 % и сжимающих остаточных напряжений до -650 МПа. Упрочнение же образцов из сплавов ВТ9 и ЭИ787-ВД стеклянными микрошариками при давлении $P = 0,3$ МПа обеспечило повышение предела выносливости соответственно на 18 и 25 %. При этом степень наклена и величи-

на сжимающих остаточных напряжений для ВТ9 составили соответственно 11 % и –610 МПа, а для ЭИ787-ВД – 11 % и –580 МПа. Точно такое же упрочнение сплавов ВТ9 и ЭИ787-ВД при $P = 0,35$ МПа позволило увеличить предел выносливости соответственно на 33 и 50 %. В этом случае степень наклена и величина сжимающих остаточных напряжений для ВТ9 составили соответственно 13 % и –700 МПа, а для ЭИ787-ВД – 13 % и –660 МПа.

Параметры, характеризующие состояние поверхностного слоя деталей, в том числе и остаточные напряжения, при эксплуатации деталей в составе изделия непрерывно изменяются. При этом интенсивность изменения данных параметров будет зависеть от исходных физико-механических и химических характеристик и условий эксплуатации, т.е. температуры, общего уровня напряжений (суммы остаточных и внешних напряжений) и т.д. Поэтому для прогнозирования надежности и работоспособности деталей и изделий в целом необходимо знание влияния условий эксплуатации на параметры состояния поверхностного слоя.

Установлено, что при испытании среднеуглеродистых сталей в условиях чистого изгиба и температуре 20°C , соответствующей температуре нормальных условий, при продолжительности испытаний от 6500 до 50000 часов и напряжении близком к пределу текучести релаксация макронапряжений практически отсутствует.

На рис. 2.12 представлены результаты исследования влияния величины и знака остаточных напряжений на относительную величину предела выносливости жаропрочного сплава ХН70ВМТЮ и титанового сплава ВТ9 [31]. По утверждению автора данной работы А.Н. Петухова сжимающие остаточные напряжения всегда способствуют повышению предела выносливости, однако их влияние на усталость гладких образцов значительно меньше, чем отрицательное влияние растягивающих остаточных напряжений. При достижении растягивающими напряжениями величины, соответствую-

щей пределу текучести, предел выносливости у титанового сплава может составлять лишь 0,1 от исходного значения σ_{-1} . Наибольшее влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости наблюдается при нормальной и умеренной температурах.

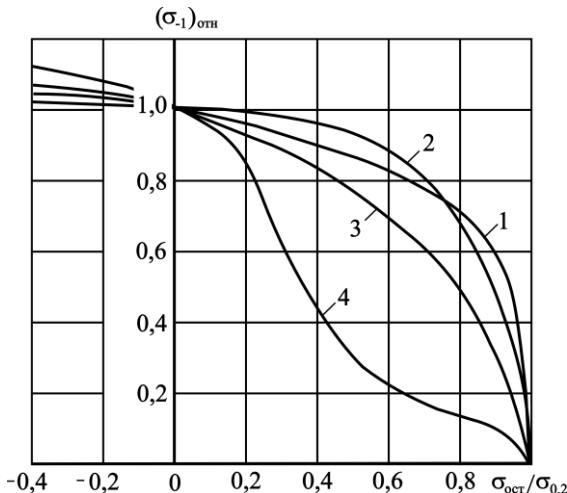


Рис. 2.12. Зависимости относительной величины предела выносливости от величины и знака остаточных напряжений:

1 – сталь XН70ВМТЮ, $T_{\text{исп}} = 700^{\circ}\text{C}$; сплав ВТ9;

2 – $T_{\text{исп}} = 20^{\circ}\text{C}$; 3 – $T_{\text{исп}} = 400^{\circ}\text{C}$; 4 – $T_{\text{исп}} = 450^{\circ}\text{C}$

Согласно данным работы [42], релаксация технологических остаточных напряжений в жаропрочном титановом сплаве ВТ9 после операции виброгалтовки, выполненной на различных режимах, наблюдается начиная с 400°C . Причем с ростом температуры процесс релаксации остаточных напряжений резко интенсифицируется, а при 600°C имеет место полное снятие последних.

Влияние температуры на релаксацию остаточных напряжений в поверхностном слое образцов и деталей из жаропрочных сплавов изложено в работах [29, 42]. Так, в работе [29] отмечено, что за-

метная релаксация остаточных напряжений в образцах из сплава ХН77ТЮР, подвергнутых алмазному выглаживанию, наблюдается при 600°C и выше. Причем интенсивность релаксации больше у образцов, имеющих большую степень упрочнения, т.е. выглаженных при больших значениях силы P_y . По данным же авторов работы [42] повышение температуры нагрева жаропрочных сплавов ХН70ВМТЮ, ХН55ВМТФКЮ и ХН70ВМТЮФ до $700\ldots 750^{\circ}\text{C}$ заметно не сказывается на изменении величины и характера распределения макронапряжений. А при температурах, равных $900\ldots 950^{\circ}\text{C}$, остаточные напряжения практически полностью релаксируются.

Таким образом, для обеспечения заданных эксплуатационных характеристик деталей, в том числе за счет сохранения упрочненного слоя со сжимающими остаточными напряжениями, для каждого материала должна быть обеспечена температурно-ресурсная зона работы.

2.2.3. ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ И ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Понятие о структуре металлов и сплавов приведено в п.1.1.2. Фазой же называется однородная часть системы отделенная от других частей системы (фаз) поверхностью раздела при переходе через которую химический состав или структура вещества изменяется скачком [10].

В условиях механической обработки резанием и поверхностным пластическим деформированием под действием силового воздействия инструмента на заготовку происходит деформационное упрочнение поверхностного слоя металла заготовки, которое сопровождается его структурными изменениями. При этом в кристаллической решетке значительно увеличивается число дислокаций, вакансий и других дефектов. Имеет место дробление зерен на

отдельные фрагменты и блоки с последующей их угловой разориентацией, а также происходит изменение формы и размеров зерен. У поверхности они измельчаются и вытягиваются в направлении воздействия силы деформирования. При этом возможно формирование текстуры.

При пластическом деформировании примерно 10 % затраченной энергии поглощается металлом (сплавом), из которых 98 % составляет энергия искажения кристаллической решетки. В связи с этим внутренняя энергия деформированного металла возрастает, и он переходит в неравновесное состояние [44].

Как уже отмечалось в п.1.1.2, на интенсивных режимах резания при механической обработке материалов, в частности лезвийной, а наиболее часто – абразивной, в поверхностном слое деталей под воздействием высоких температур могут возникать структурные и фазовые превращения. Эти превращения связаны с объемными изменениями кристаллической решетки металла и оказывают негативное влияние на эксплуатационные характеристики деталей. При этом в слоях со структурой, имеющей больший удельный объем, формируются остаточные напряжения сжатия, а в слоях со структурой меньшего удельного объема – остаточные напряжения растяжения. Следует отметить, что мартенсит (твердый раствор углерода в α -железе $Fe_\alpha(C)$) имеет наибольший удельный объем, а переход, например, аустенита (твердый раствор углерода в γ -железе $Fe_\alpha(C)$) в мартенсит сопровождается уменьшением координационного числа кристаллической решетки и уменьшением компактности. Если бы это уменьшение не компенсировалось в значительной степени уменьшением атомного радиуса, то железо должно было бы при превращении $\gamma \rightarrow \alpha$ увеличиваться в объеме на 9 %. На самом деле (благодаря уменьшению атомного радиуса) объем железа увеличивается при этом примерно на 1 %. Однако и это имеет большое значение для структурных напряжений [10].

Структурно-фазовые превращения, например, после операций шлифования проявляются в виде шлифовочных прижогов либо отпуска, либо закалки с отпуском.

Прижоги отпуска могут иметь место при нагреве шлифуемой поверхности ниже температуры фазовых превращений. У металлов со структурой мартенсита в поверхностном слое в результате его распада образуются троостомартенсит, троостит или троостосорбит (рис. 2.13, а). Металлографически прижоги отпуска после операций травления проявляются в виде темных пятен или полосок на сером фоне.

Прижоги закалки с отпуском возникают при нагреве обрабатываемых в процессе шлифования поверхностей до температур, превышающих температуру фазовых превращений, и скорости охлаждения больше критического значения. В этом случае в верхней зоне поверхностного слоя располагается вторично закаленный слой, под которым находится отпущеный слой (рис. 2.13, б). В сталях мартенситного класса закаленный слой имеет аустенитно-мартенситную структуру с нерастворившимися включениями карбидов. Металлографически прижоги закалки с отпуском после операций травления проявляются в виде светлых пятен или полосок на сером фоне.

При наличии прижогов отпуска происходит разупрочнение поверхностного слоя, сопровождающееся снижением его микротвердости. В случае возникновения прижогов закалки с отпуском микротвердость во вторично закаленном слое возрастает, а при переходе к отпущеному слою она резко падает.

Как уже отмечалось ранее, структурно-фазовые изменения в поверхностном слое приводят к формированию в нем растягивающих остаточных напряжений, снижающих предел выносливости деталей.

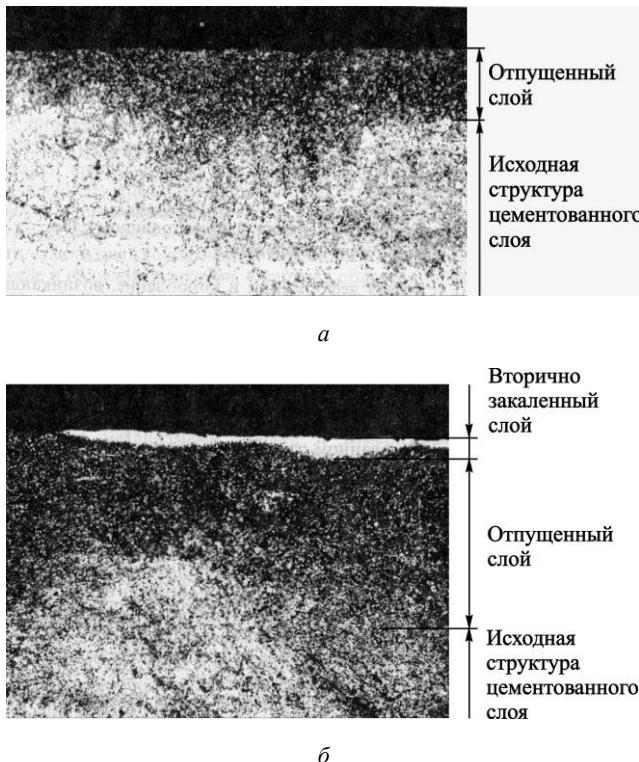


Рис. 2.13. Микроструктура поверхностного слоя зуба колеса, подвергнутого цементации и закалке, с прижогами отпуска (*а*) и закалки с отпуском (*б*) после операции зубошлифования; х270 [14]

На рис. 2.14 показано распределение остаточных напряжений в роликовых образцах из стали 20Х3МВФ-Ш после обработки их на зубошлифовальном станке 5831 методом обкатки коническим кругом на режимах, приводящих к образованию прижогов. Из данного рисунка видно, что с ростом глубины резания увеличивается и глубина залегания шлифовочных прижогов. Это обусловлено ростом среднеконтактной температуры в зоне резания и увеличением скоростей нагрева и охлаждения тонких поверхностных

слоев, в результате чего в них происходят фазовые превращения, приводящие к образованию структурных составляющих, имеющих меньший удельный объем, чем у мартенсита. Это в наибольшей степени и способствует образованию в поверхностном слое растягивающих остаточных напряжений и снижению предела выносливости деталей, о чём было изложено в п. 2.2.2 данного пособия.

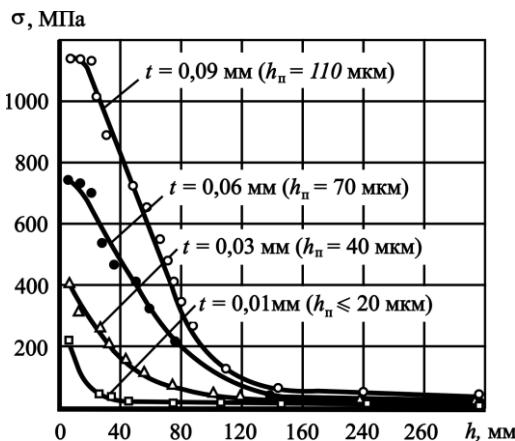


Рис. 2.14. Распределение остаточных напряжений σ по глубине поверхности слоя h в образцах из стали 20Х3МВФ-Ш после шлифования при различной глубине резания t и наличии прижогов с глубиной залегания h_n [14]:

$$\varphi = 60' ; v_{np} = 8 \text{ м/мин}$$

В результате механотермического воздействия режущего инструмента на поверхностный слой обрабатываемого металла, а также вследствие их взаимодействия с окружающей средой в поверхностных слоях заготовки и инструмента могут произойти изменения химического состава.

Обрабатываемая поверхность металла обладает повышенной химической активностью, вследствие чего в условиях резания она адсорбирует атомы элементов окружающей среды, покрываясь

слоями газов, паров воды и жиров. Кроме того, под воздействием внешней среды на поверхности металла происходит образование различных соединений и прежде всего различных оксидов толщиной $2 \cdot 10^{-9} \dots 1 \cdot 10^{-8}$ м.

В результате процесса диффузии, имеющей место при температурах выше $800 \dots 900$ °С, в поверхностном слое заготовок могут образовываться химические соединения основного металла с проникающими извне веществами, в частности химическими элементами режущего инструмента. Достаточно высокая диффузионная подвижность атомов может привести к изменению концентрации легирующих элементов в поверхностном слое заготовок, например, к обезуглероживанию в сталях, обеднению хромом и алюминием в жаропрочных никелевых сплавах и т.д. Следует отметить, что поверхностные трещины и границы зерен являются некими магистралями для проникновения чужеродных атомов в обрабатываемый металл. Диффузия через поверхность заготовки оказывает весьма сильное влияние на свойства металлов и особенно их поверхностный слой [44].

Таким образом, исходя из ранее изложенного материала, можно сделать заключение, что структурно-фазовые превращения и изменения химического состава, происходящие в поверхностном слое деталей при механической обработке металлов (сплавов), отрицательно влияют на их физико-механические и химические характеристики.

3. МЕТОДОЛОГИЯ И СРЕДСТВА ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ И ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

3.1. ОПТИМИЗАЦИЯ КАК ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

Назначение параметров процессов механической обработки находится в тесной взаимосвязи с их производительностью, себестоимостью, стойкостью инструмента и техническими требованиями, предъявляемыми к качеству обработки. Интенсификация режимов обработки с целью повышения производительности технологических процессов негативно сказывается на стойкости инструмента и неоднозначно на себестоимости обработки, что видно из рис. 3.1. Поэтому управление процессами механической обработки посредством регулирования (оптимизации) их параметров состоит в решении комплекса компромиссных задач, удовлетворяющих противоречивым требованиям.

Термин оптимизация, в соответствии с работой [40], – это: 1) процесс выбора наилучших вариантов из возможных; 2) процесс приведения системы в наилучшее (оптимальное) состояние. Тогда, исходя из данного определения, оптимизация процесса механической обработки – это выбор такого варианта управления, при котором достигается экстремальное значение критерия, характеризующего качество управления. При этом следует различать критерии оптимизации и оптимальности. Критерий оптимизации или целевая функция – это критерий, который определяет качество управления, а критерий оптимальности его заданная величина [41].

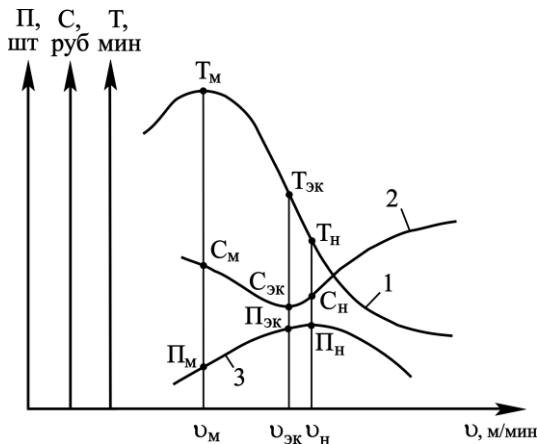


Рис. 3.1. Схема влияния скорости резания на стойкость (1), себестоимость (2) и производительность обработки (3):

T_M – максимальный период стойкости; $T_{ЭК}$ – экономический период стойкости; T_m – период стойкости, соответствующий наибольшей (максимальной) производительности; C_m – себестоимость, соответствующая максимальному периоду стойкости; $C_{ЭК}$ – себестоимость (наименьшая), соответствующая экономическому периоду стойкости; C_m – себестоимость, соответствующая периоду стойкости наибольшей производительности; Π_m – производительность, соответствующая максимальному периоду стойкости; $\Pi_{ЭК}$ – производительность, соответствующая экономическому периоду стойкости; Π_h – наибольшая производительность

Используемые при оптимизации критерии можно разделить на дифференциальные и составные (интегральные). Дифференциальные критерии в свою очередь, например, применительно к процессам механической обработки подразделяются на физические и экономические.

Физические критерии – это стойкость инструмента, удельная энергоемкость процесса, температура резания, остаточные напряжения и т.д. К экономическим критериям относятся производительность обработки, себестоимость перехода или операции и т.п.

Интегральные критерии базируются на комплексной оценке процесса обработки и учитывают частные критерии оценки. При этом интегральные критерии могут быть трех типов: аддитивными, мультипликативными и минимаксными. Зависимости для определения данных критериев приведены в [51].

Задача оптимизации, как эффективного метода управления, заключается в построении математической модели рассматриваемого процесса, в частности, например, процесса механической обработки. При этом под моделью, по утверждению автора работы [34], следует понимать либо реальную физическую систему, либо ее математическое описание, позволяющее отразить свойства моделируемого объекта или характеристики процесса близко к реальным. В общем виде математическая модель отдельного объекта, процесса или явления может быть представлена в виде совокупности или системы математических зависимостей, связывающих параметры, характеризующие рассматриваемый объект, процесс или явление, в том числе и различные ограничения, накладываемые на эти параметры и выражаемые в виде уравнений и неравенств:

$$Z = f(x); \quad (3.1)$$

$$g_i(x) \geq 0 \quad i=1, 2, \dots, p; \quad (3.2)$$

$$h_i(x) = 0 \quad i=1, 2, \dots, q; \quad (3.3)$$

$$x \in Z.$$

Выражение (3.1), устанавливающее взаимосвязь между переменными, представляет собой функцию цели и является критерием оптимизации. Зависимость (3.2) является множеством ограничений-неравенств, а выражение (3.3), в свою очередь, представляет собой множество ограничений в виде уравнений.

Следует отметить, что для различных объектов или процессов форма записи математической модели (3.1)-(3.3) может иметь раз-

личный вид. Например, в некоторых случаях может быть достаточно только функции цели (3.1) или выражений (3.1) и (3.2). При этом соответствие математической модели реальному объекту или процессу будет в значительной степени зависеть от знания объекта оптимизации и умения технолога его описать математически.

В зависимости от назначения оптимизация может быть структурной и параметрической. Структурная оптимизация применительно к технологии машиностроения заключается в определении оптимальной структуры технологического процесса, а именно: вида заготовки, последовательности операций (технологического маршрута) и переходов в них и т.д. Параметрическая оптимизация предназначена для выбора оптимальных режимов резания или упрочнения, например, на операциях механической обработки. Оптимизация, как отмечено в работе [41], может быть также внешней, выполняемой вне станка, и внутренней, осуществляющейся при обработке заготовки на станке или ином технологическом оборудовании.

При осуществлении процедуры оптимизации и выбранных при этом целях возможна реализация как одноцелевой, так и многокритериальной (многоцелевой) оптимизации. В условиях одноцелевой оптимизации определяется экстремум одной целевой функции, а при многокритериальной – производится поиск экстремума для двух или нескольких критериев оптимизации. Задача многокритериальной (векторной) оптимизации применительно к какой-либо операции механической обработки заключается в выборе одного из нескольких возможных вариантов ее осуществления, каждый из которых включает в себя совокупность определенных условий для проведения операции. Причем условия проведения операции, в принципе, могут быть не оптимальными ни для одной из используемых целевых функций, но могут оказаться наиболее приемлемыми для всей их совокупности. При ре-

шении задач многокритериальной оптимизации используются методы последовательной оптимизации или методы, при использовании которых строится обобщенный критерий $F(x)$, являющийся функцией критериев оптимальности $F(x_j)$.

Для условий автоматизированного производства, по мнению автора работы [41], многокритериальная оптимизация является все же более перспективной, так как она позволяет снять противоречия между экономическими показателями процесса обработки (резания или упрочнения методами ППД) и условиями его протекания.

Если в процессе оптимизации находят наиболее приемлемое значение одного или значения нескольких управляемых параметров, то такая оптимизация называется выборочной. В том же случае, если одновременно оптимизируют параметры инструмента, режима обработки, состав смазывающе-охлаждающего технологического средства (СОТС) и т.д., то такая оптимизация именуется комплексной.

Методы оптимизации подразделяют на детерминированные и стохастические. В случае применения оптимизации в детерминированной (статистической) постановке все входящие в математическую модель параметры считаются постоянными, а действие систематических и случайных возмущающих параметров исключается. При оптимизации в стохастической (динамической) постановке учитывается вероятность природы процессов резания или упрочнения. Однако действие возмущающих параметров учитывается априорно.

При оптимизации процессов механической обработки в детерминированной постановке невозможно обеспечить надежность протекания данных процессов с уровнем доверительной вероятности выше 0,5...0,6, т.е. в этом случае возможно невыполнение ограничений связанных со стойкостью инструмента, точностью обработки, шероховатостью поверхности, остаточными напряже-

ниями и т.д. Тем не менее, данный метод оптимизации в связи с его относительной простотой получил наиболее широкое распространение. При такой оптимизации, управление процессом обработки на любой рассматриваемой операции осуществляется посредством определения рациональных условий резания или упрочнения. Следует отметить, что полученные результаты могут быть использованы как при одноинструментальной обработке на универсальном оборудовании, так и на оборудовании с ЧПУ. При этом для обеспечения стабильности процессов механической обработки на оборудовании с ЧПУ негативное влияние возмущающих факторов может быть компенсировано за счет введения приемлемых для производства технологических запасов [36].

Оптимизация процессов резания и упрочнения в стохастической постановке (статистическая оптимизация), по данным автора работы [41], позволяет обеспечить надежность протекания указанных ранее процессов с уровнем доверительной вероятности равным 1, но это приведет к значительному снижению производительности и увеличению себестоимости обработки.

3.2. МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ

С математической точки зрения процесс оптимизации сводится к поиску абсолютного оптимума целевой функции (3.1) при ограничениях (3.2) и (3.3), учитывая, что $x \in Z$. При этом под оптимумом следует понимать максимум либо минимум. Для упрощения данного поиска сведем проблему оптимума к определению максимума или минимума, не акцентируя внимание на случаях, в которых это имеет место.

Как изложено в работе [34], максимум можно определить следующим образом. Если функция $F(x)$ существует в замкнутом множестве Z , лежащем в области E^n (в n – мерном евклидовом пространстве), то функция достигает своего абсолютного макси-

мума $F \subset Z$ в точке x^* , когда $f(x) \leq f(x^*)$ в каждой точке $x \in F$. Здесь символом F обозначено подмножество множества Z , охватывающего все точки $x_0 \in Z$, в которых выполняются условия $g_i(x_0) \geq 0$ ($i = 1, 2, \dots, p$) и $h_i(x_0) = 0$ ($i = 1, 2, \dots, q$).

Исходя из данного определения, можно сделать предположение, что нахождение оптимума не должно быть слишком сложным. Тем не менее, даже в случае простейшей модели, например, непрерывной функции, не имеющей никаких ограничений, поиск оказывается не совсем простым, как это может показаться на первый взгляд.

Рассмотрим в частности задачу о минимальных значениях полной функции $u = u(x)$ для всех действительных значений переменной x . Будем считать, что график функции $u = u(x)$ имеет вид, приведенный на рис. 3.2. После выполнения процесса дифференцирования и приравнивания производной данной функции нулю получим уравнение $u'(x) = 0$, имеющее следующие решения: $x = x_1, x_2, x_3, x_5, x_5$. Среди полученных пяти решений три решения (x_1, x_3, x_5) образуют локальные максимумы, а два (x_2, x_4) – локальные минимумы. Из полученных двух минимумов один будет абсолютным, так как предполагается, что область x имеет замкнутый интервал $[a, b]$.

Как отмечено в работе [34], значительно труднее определять точки более сложной природы в частности те точки, в которых производная хотя и равна нулю, однако они не являются локальными максимумами или минимумами. Так, например, если обратиться к функции $u = x^3$, то она не имеет локального минимума или максимума при значении $x = 0$, хотя ее производная $u' = 3x^2 = 0$. Следует отметить, что сложности существенно возрастают при наличии функций со многими действительными пе-

ременными. Если же исследуются функционалы [40], то задача определения характера точки, в которой первая производная равна нулю, становится особенно сложной и трудоемкой. При наложении же определенных ограничений на изменение аргумента возникают новые трудности при решении задачи. Это хорошо видно на примере решения задачи минимизации функции $u = u(x)$ в замкнутом интервале $[a, b]$.

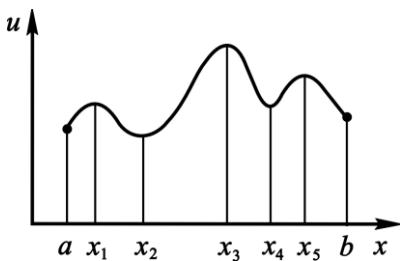


Рис. 3.2. Локальные экстремумы функции $u(x)$ [34]

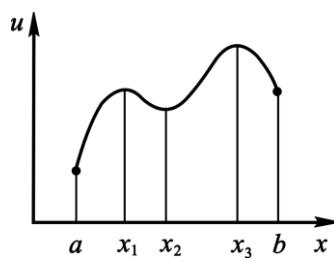


Рис. 3.3. Пример нахождения абсолютного минимума функции в крайней точке интервала $[a, b]$ [34]

Как уже отмечалось ранее по тексту, посредством дифференцирования можно определять точки, в которых первая производная равна нулю. Однако в отдельных случаях, как видно из рис. 3.3, минимальное значение исследуемой функции $u = u(x)$ может находиться в одной из крайних точек интервала $[a, b]$, а если же функция $u = u(x)$ в интервале $[a, b]$ не дифференцируема, то это приведет к более существенному усложнению задачи оптимизации.

Исходя из ранее изложенного, выбор метода поиска оптимума функции будет зависеть от формы математической модели. В целом все математические модели можно разделить на модели с ограничениями и модели без ограничений. Математические модели с ограничениями в свою очередь делятся на три подгруппы:

с ограничениями в виде равенств; с ограничениями в виде неравенств; со смешанными ограничениями, т.е. в виде равенств и неравенств.

В зависимости от характеристик функций цели, ограничений, области решений и множества возможных решений x применяются различные методы определения оптимума. Функции цели, как правило, делятся на четыре группы, а именно: линейные, квадратичные, разомкнутые и нелинейные. Следует отметить, что в том случае, если возникают трудности, связанные с отнесением функции цели к одной из ранее указанных групп, то необходимо использовать метод исключения. Так, например, в том случае если установлено, что функции не являются ни линейными, ни квадратичными, то их следует отнести к нелинейным функциям.

Ограничения, используемые в математических моделях, делятся на линейные и нелинейные, т.е. имеют место математические модели, содержащие только линейные ограничения, либо нелинейные, либо их совокупность.

Области полученных решений подразделяются на выпуклые и невыпуклые множества [30]. При этом в диапазоне изменения x в множестве Z может иметь место неограниченное число групп значений. Однако наиболее часто встречающимися являются следующие группы: постоянных значений; целых чисел; дискретных и смешанных значений. На рис. 3.4 представлена схема классификации существующих математических моделей оптимизации. Для осуществления поиска оптимальных решений в настоящее время разработан ряд общих методов и технических решений. Первым из этого ряда был разработан классический метод дифференцирования, а последующими методами – методы линейного, квадратичного, динамического программирования и др. [34]. При этом отдельные методы, как видно из рис. 3.4, предназначены для нахождения оптимальных решений лишь для определенной группы математических моделей.

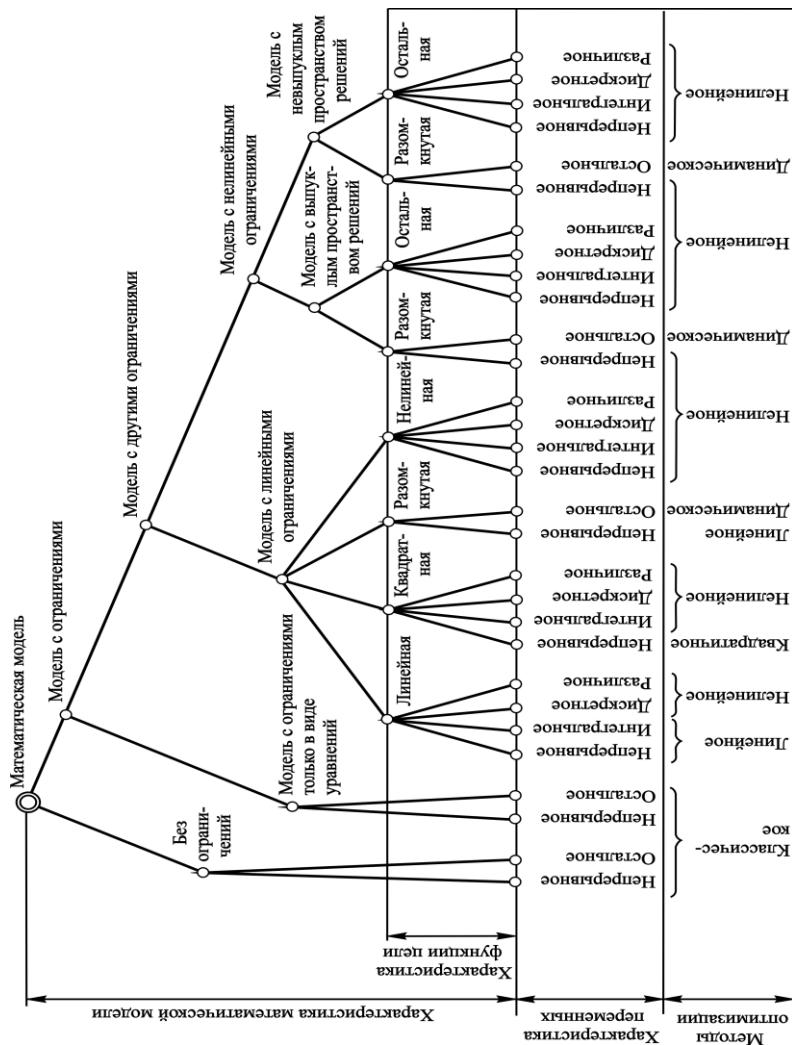


Рис. 3.4. Классификация моделей оптимизации [34]

3.3. МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ

Изучению теории и методам оптимизации посвящены соответствующие университетские курсы [21, 25, 27], успешное освоение которых требует от обучающихся немалых усилий и временных затрат. Поэтому в данном разделе пособия дана лишь общая характеристика некоторых наиболее важных методов оптимизации.

Исходя из стратегии поиска оптимального решения, можно выделить следующие четыре группы методов: аналитические, рекурсивные, итерационные и стохастические.

Аналитические методы оптимизации получили широкое применение для решения классических задач, а также оптимизационных задач с ограничениями в виде соответствующих уравнений. Для решения задач, не содержащих ограничений, применяются методы, базирующиеся на исследовании производной функции. Приравнивая первую производную нулю, находятся точки экстремума, после чего посредством второй производной эти точки исследуются на предмет нахождения максимума.

При наличии ограничений в виде уравнений существует два пути их ввода в функцию цели. Первый из них заключается в подстановке этих уравнений в функцию цели. Этот путь является наиболее простым. Однако для осуществления данной процедуры необходимо чтобы множество уравнений было замкнутым, а это бывает достаточно редко. Как отмечено в работе [34], вторым путем введения ограничений является применение метода Лагранжа. Этот метод пригоден для различных случаев и является более эффективным.

Функция Лагранжа, преобразованная для этой цели, представляет собой следующую зависимость [34]:

$$F(x, \lambda) = f(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i [b_i - g_i(x)].$$

Для нахождения оптимума частные производные этого уравнения приравнивают нулю. Посредством использования данного метода составляют m ограничивающих уравнений вида $g_i(x) = b_i$. Для описания каждого ограничения имеется соответствующая переменная λ_i , получившая наименование множителя Лагранжа. Следует отметить, что необходимым условием для практического использования указанного метода является то, чтобы описываемые функции были дифференцируемыми.

Отличительная особенность рекурсивных методов состоит в определении одной переменной за одну расчетную операцию. К этой группе методов принадлежит и метод динамического программирования, разработанный американским математиком Р. Беллманом.

Использование метода динамического программирования, т.е. метода решения задачи, основанного на разбиении её на несколько одинаковых подзадач, рекуррентно связанных между собой, возможно при наличии специальной функции цели и дискретных значений переменных. В отдельных случаях посредством применения метода аппроксимации можно получить непрерывные переменные. Метод динамического программирования следует использовать при анализе многоэтапных процессов принятия оптимальных решений. Он наиболее эффективен при небольшом числе ограничений, входящих в математическую модель. Описание данного метода подробно изложено, например, в работах [25, 27].

Наибольшую группу в методике поиска оптимальных решений, безусловно, составляю итерационные методы, позволяющие, однако находить только локальные оптимумы.

Различают два итерационных метода, а именно методы линейного и нелинейного программирования. Метод линейного программирования нашел применение для решения линейных задач, т.е. когда функция цели и ограничения (равенства или неравенства) в математических моделях являются линейными, а все пере-

менные в указанных моделях – непрерывными функциями. В основе данного метода программирования лежит предположение, что оптимальное решение находится в одном из углов многоугольника. В теории линейного программирования доказывается [49], что в том случае, если система ограничений не противоречива, т.е. совместна, указанный многоугольник является выпуклым. Под выпуклым понимается такой многоугольник, который всегда будет лежать по одну сторону от прямой линии, проходящей через его любую сторону. Координаты вершин многоугольника представляют собой корни совместного решения уравнений, а точки, принадлежащие площади, ограниченной данным многоугольником, удовлетворяют всем неравенствам. Наиболее известным итерационным методом, используемым для решения задач линейного программирования, является симплекс-метод.

Следует отметить, что многие практические задачи, связанные с нахождением оптимума, в том числе и при определении параметров технологических процессов механической обработки можно представить в таком виде, чтобы они решались методом линейного программирования. В том случае, если целевая функция нескольких переменных в математической модели оптимизации имеет квадратичный вид при линейных ограничениях на эти переменные, то решение задачи оптимизации можно решать методом квадратичного программирования, являющегося частным случаем нелинейного программирования. Если переменные представлены только в виде целых чисел, то для решения задачи нахождения оптимума используется метод целочисленного программирования, который является частным случаем линейного программирования.

В целом метод линейного программирования подробно изложен в работах [21, 25, 27, 30]. Этот метод, например, достаточно широко используется для определения оптимальных (рациональных) условий формообразования на операциях механической обработки материалов. Так, в работах [36-38] приведены линейные

математические модели, а также алгоритмы и программы расчета, написанные на языке Delphi, для определения рациональных условий обработки на операциях точения и растачивания [36-38], круглого наружного и внутреннего шлифования [36-38], концевого фрезерования [37] и алмазного выглаживания [37]. Оптимизация параметров механической обработки посредством метода линейного программирования при точении, сверлении, фрезеровании и круглом шлифовании приведена также в работах [8, 9].

Для решения нелинейных задач, связанных с нахождением оптимума, в отличие от аналогичных линейных задач общие методы решения в настоящее время отсутствуют. А каждый из нескольких разработанных частных методов относится лишь к определенной области.

В случае применения итерационных методов, весьма сложно использовать дискретные переменные. Для используемых методов нелинейного программирования присуще непосредственное отыскание оптимального решения. Эти методы можно разделить на две группы: методы, базирующиеся на расчетах градиента, и методы, не требующие выполнения этих расчетов. При этом, как известно, большинство существующих методов непосредственного определения оптимума нельзя использовать для поиска оптимального решения задачи применительно к математическим моделям с ограничениями. Поэтому такие модели в каждом конкретном случае необходимо привести к моделям, в которых не требуются ограничения. Одним из таких методов является метод Лагранжа, о котором сообщалось ранее [34].

Известным методом, базирующимся на расчете градиентов, является метод наиболее быстрого убывания. Сущность данного метода заключается в том, что на начальном этапе для произвольной точки рассчитывается градиент, после чего осуществляется следующий шаг в направлении наибольшего убывания градиента и процедуру расчета выполняют для новой точки. Как показывает

опыт практического применения, эффективность данного метода заложена в правильном подборе длины шага.

Существует также определенный ряд методов, которые не требуют расчета градиента. Однако часть из них можно использовать лишь при решении оптимизационных задач с одной переменной. К этой части методов следует отнести, например, метод Фибоначчи, имеющий наиболее высокую эффективность. В основе этого метода лежит отыскание оптимума в произвольно выбранном направлении. В остальных методах данного вида применяют другие стратегии поиска. Таким образом, все методы непосредственного поиска оптимума содержат процедуры выбора направления поиска решения или длины шага.

Практика показывает, что к числу основных проблем при использовании метода непосредственного поиска оптимального решения следует отнести достижение требуемой степени точности точки оптимума в процессе её определения. Это связано с тем, что функция цели может иметь разную чувствительность в направлении той или иной оси. Для исключения влияния данного фактора на чувствительность в отдельных случаях возникает необходимость в изменении масштаба переменных. В этом случае их влияние на функцию цели станет более равномерным.

Стохастические методы или методы случайного поиска решений – эта группа методов, в которых используется случайность в процессе решения оптимизационных задач. Данные методы включают в себя процедуры накопления и обработки информации. Как отмечено в работе [34], методы случайного поиска решений получили наиболее широкое применение при решении вопросов оптимального проектирования. Отличительной особенностью указанных методов является простота, надежность, хорошая сходимость расчетных и натурных экспериментальных результатов, а также отсутствие сложностей в осуществлении программирования процесса оптимизации. Обладая ранее указанными характеристи-

ками, случайный поиск решений стал практически одним из наиболее эффективных и универсальных методов оптимизации. В значительной мере это утверждение относится к получению оптимальных решений в многомерных пространствах. Высокая эффективность процесса вычисления обеспечивается применением алгоритмов с самообучением. При этом под самообучением следует понимать процесс некоторого преобразования метода случайного поиска, т.е. деформирование свойств случайности в целях повышения скорости, точности, надежности и других характеристик случайного поиска оптимального решения.

Использование методов случайного поиска при нахождении оптимальных решений базируется на том, что число операций, связанных с расчетом значения функции, приходящихся на один шаг, в данных методах заметно меньше, чем в методе градиентов с увеличенным числом переменных. Неоспоримым преимуществом методов случайного поиска решения состоит также в возможности достаточно простого введения любых ограничений для аргументов функции, к сожалению, это не всегда удается при использовании системных методов. Однако при применении методов случайного поиска решений требуется проведение обобщения случайных чисел при заданном их распределении. В настоящее время существует достаточно много методов случайного поиска оптимального решения. При этом основное их отличие от ранее рассмотренных системных методов заключается в стратегии поиска.

Представленный в данной главе в очень кратком виде обзор методов оптимизации является лишь некоторым напутствием в изучение вопросов, связанных с нахождением оптимальных решений при проектировании технологических процессов механической обработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для создания конкурентоспособных изделий машиностроения и в частности изделий авиационной техники в настоящее время все шире используются современные технологические процессы. Однако, несмотря на применение точных методов получения заготовок посредством литья под давлением, по выплавляемым моделям, посредством различных аддитивных технологий и т.д. операции механической обработки продолжают доминировать в технологических процессах. А это значит, что обеспечение заданных требований к точности обработки и состоянию поверхностного слоя деталей на данных операциях по прежнему имеет одно из определяющих значений для достижения эксплуатационных характеристик, установленных техническим заданием на изделие. Поэтому знание влияние параметров состояния поверхностного слоя на эксплуатационные свойства деталей машин имеет большое значение для технologа, проектирующего технологические процессы. Эти знания необходимы для разработки оптимальных технологических процессов, которые целесообразно осуществлять посредством структурной и параметрической оптимизации. В связи с чем, знание теории и методов оптимизации необходимо современному технологу как инструмент для проектирования технологических процессов.

Авторы надеются, что материалы, изложенные в учебном пособии, помогут студентам, обучающимся по машиностроительным направлениям и специальностям, в освоении дисциплин, связанных с технологией изготовления изделий различных отраслей промышленности и смежных с ними курсов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Батаев, В.А. Методы структурного анализа материалов и контроля качества деталей: учебное пособие / В.А. Батаев, А.А. Батаев, А.П. Алхимов. – М.: Флинта; Наука, 2007. – 224 с. – ISBN 978-5-9765-0207-9 (Флинта); ISBN 978-5-02-034811-0 (Наука).
2. Белкин, И.М. Допуски и посадки (Основные нормы взаимозаменяемости): учебное пособие / И.М. Белкин. – М.: Машиностроение, 1992. – 528 с. – ISBN 5-217-01319-2.
3. Бобровский, Н.М. Инновационные технологии механической обработки деталей машин поверхностно-пластическим деформированием: учебное пособие / Н.М. Бобровский, И.Н. Бобровский. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2013. – 80 с.
4. Болдырев, А.И. Достигнение заданного качества материала управлением технологическими условиями комбинированной обработки / А.И. Болдырев // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2010. – Т. 3. – № 1(46). – С. 27-31.
5. Болдырев, А.И. Экспериментальные исследования состояния поверхностного слоя после электрохимикомеханической обработки / А.И. Болдырев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – Т. 6. – № 10. – С. 15-20.
6. Волков, Д.И. Технологические возможности обработки металлическими и стеклянными микрощариками материалов ВТ9 и ЭИ787-ВД / Д.И. Волков, А.Ю. Гущин, А.Н. Рыкунов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2017. – Т. 13. – № 8. – С. 365-369.
7. Голыгин, И.Х. Основы взаимозаменяемости: учебное пособие / И.Х. Голыгин, С.Е. Педь, П.В. Дружинин. – М.: Изд-во МИИГАиК, 2020. – 316 с. – ISBN 978-5-91188-079-8.
8. Грубый, С.В. Математическое моделирование и оптимизация механической обработки: учебник / С.В. Грубый. – М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 212 с. – ISBN 978-5-9729-1033-5.
9. Грубый, С.В. Оптимизация механической обработки: учебник / С.В. Грубый. – СПб.: Изд-во «Лань», 2019. – 140 с. – ISBN 978-5-8114-3800-6.
10. Гуляев, А.П. Металловедение: учебник для вузов / А.П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.

11. Данчин, И.А. Влияние отклонений формы опорных поверхностей гидростатодинамических подшипников на динамические характеристики роторных систем: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06.: защищена 27.05.2007 / Данчин Игорь Анатольевич. – Орел, 2007. – 162 с.
12. Демин, Ф.И. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей: учебное пособие / Ф.И. Демин, Н.Д. Проничев, И.Л. Шитарев. – М.: Машиностроение, 2002. – 328 с. – ISBN 5-217-03119-0.
13. Добровольский, В.И. Влияние шероховатости поверхности на циклическую прочность и долговечность штамповой стали при комнатной и повышенной температурах / В.И. Добровольский, С.В. Добровольский // Интеллектуальные системы в производстве. – 2018. – Т. 16. – № 2. – С. 24-27.
14. Елисеев, Ю.С. Производство зубчатых колес газотурбинных двигателей: произв.-практ. издание / Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, И.П. Нежурин [и др.]; под ред. Ю.С. Елисеева. – М.: Высшая школа, 2001. – 493 с. – ISBN 5-06-004192-1.
15. Зайцев, Г.Н. Нормирование точности геометрических параметров машин: учебное пособие / Г.Н. Зайцев, С.А. Любомудров, В.К. Федюкин; под ред. В.К. Федюкина. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 368 с. – ISBN 978-5-7695-3749-3.
16. Иващенко, И.А. Проектирование технологических процессов производства двигателей летательных аппаратов / И.А. Иващенко. – М.: Машиностроение, 1981. – 224 с.
17. Ковшов, А.Н. Технология машиностроения: учебник / А.Н. Ковшов. – М.: Машиностроение, 1987. – 320 с.
18. Копылов, Ю.Р. Анализ работ по влиянию параметров качества упрочненного поверхностного слоя изделий с ограниченным запасом прочности на его сопротивление усталости / Ю.Р. Копылов, А.Н. Скляренко, А.В. Глазков // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2019. – Т. 15. – № 3. – С. 117-121.
19. Копылов, Ю.Р. Виброударное упрочнение / Ю.Р. Копылов. – Воронеж: ВИМВ РФ, 1999. – 386 с.
20. Королёв, А.Е. Влияние исходного качества деталей на износ двигателей / А.Е. Королёв, А.Г. Белов // Вестник Курганского государственного университета. – Серия «Технические науки». – Вып. 5. – 2010. – №1(17). – С. 50-51.
21. Кочегурова, Е.А. Теория и методы оптимизации: учебное пособие для вузов / Е.А. Кочегурова. – М.: Изд-во «Юрайт», 2022. – 133 с. – ISBN 978-5-534-10090-7.
22. Кравченко, Б.А. Теория формирования поверхностного слоя деталей машин при механической обработке: учебное пособие / Б.А. Кравченко. – Куйбышев: КПИ, 1981. – 99 с.

23. Кравченко, Б.А. Физические аспекты теории процесса резания металлов / Б.А. Кравченко, А.Б. Кравченко. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2002. – 167 с.
24. Куприянов, А.В. Прочность соединения с натягом при наличии погрешности геометрической формы / А.В. Куприянов // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2015. – № 3(54). – С. 145-150.
25. Лесин, В.В. Основы методов оптимизации: учебное пособие для вузов / В.В. Лесин, Ю.П. Лисовец. – СПб.: Лань, 2022. – 344 с. – ISBN 978-5-507-44229-4.
26. Маталин, А.А. Технология механической обработки. – Л.: Машиностроение, 1977. – 461 с.
27. Методы оптимизации: учебник и практикум для бакалавриата и магистратуры / под ред. Васильева. – М.: Изд-во «Юрайт», 2016. – 375 с. – ISBN 978-5-9916-6157-7.
28. Минаков, А.П. Волнистость и оценка ее влияния на эксплуатационные свойства деталей машин / А.П. Минаков, М.Е. Лустенков, И.Д. Камчицкая, П.В. Афанасьев // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2020. – № 3(68). – С. 65-75.
29. Митряев, К.Ф. Повышение эксплуатационных свойств деталей путем регулирования состояния поверхностного слоя при механической обработке: учебное пособие / К.Ф. Митряев. – Куйбышев: Куйбышев. авиац. ин-т, 1986. – 91 с.
30. Мицель, А.А. Методы оптимизации. В 2 ч. Ч.1.: учебное пособие / А.А. Мицель, А.А. Шелестов, В.В. Романенко. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2020. – 350 с. – ISBN 978-5-86889-893-8 (Ч. 1); ISBN 978-5-86889-892-1.
31. Петухов, А.Н. Сопротивление усталости деталей ГТД / А.Н. Петухов. – М.: Машиностроение, 1993. – 240 с. – ISBN 5-217-01888-7.
32. Рыжкин, А.А. Обработка материалов резанием: учебное пособие / А.А. Рыжкин, К.Г. Шучев, М.М. Климов. – Ростов н/Д.: Феникс, 2008. – 411 с. – ISBN 978-5-222-14019-2.
33. Рыжов, Э.В. Комплексный параметр для оценки свойств поверхностного трения деталей машин / Э.В. Рыжов, А.Г. Суслов, А.П. Улашкин // Трение и износ. – 1980. – Т. 1. – № 3. – С. 436-439.
34. Сикора, Е. Оптимизация процессов обработки резанием с применением вычислительных машин / Е. Сикора; сокр. пер. спольск. Д.Д. Тимонича; под ред. П.Д. Беспахотного. – М.: Машиностроение, 1983. – 226 с.
35. Скуратов, Д.Л. Обработка конструкционных материалов. Процессы резания и режущие инструменты. Часть 1: учебное пособие / Д.Л. Скуратов, В.Н. Трусов. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. – 196 с. – ISBN 978-5-7883-0896-8.

36. Скуратов, Д.Л. Определение рациональных условий обработки при производстве деталей ГТД / Д.Л. Скуратов, В.Н. Трусов. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2002. – 152 с. – ISBN 5-93424-076-5.
37. Скуратов, Д.Л. Определение рациональных условий формообразования и упрочнения поверхностей деталей на операциях механической обработки: практикум / Д.Л. Скуратов, А.Н. Швецов. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2019. – 112 с. – ISBN 978-5-7883-1406-8.
38. Скуратов, Д.Л. Оптимизация технологических процессов в машиностроении: учебное пособие / Д.Л. Скуратов, В.Н. Трусов, Д.А. Ласточкин. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 87 с. – ISBN 5-7883-0422-9.
39. Скуратов, Д.Л. Технические измерения и контроль при производстве деталей в машиностроении: лабораторный практикум / Д.Л. Скуратов, Е.В. Бурмистров, И.Г. Попов, С.Ю. Сидоров. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 160 с. – ISBN 978-5-7883-0524-0.
40. Советский энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М. Прохоров. – М.: Советская энциклопедия, 1983. – 1600 с.
41. Старков, В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. – М.: Машиностроение, 1989. – 296 с. – ISBN 5-217-00583-1.
42. Сулима, А.М. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов / А.М. Сулима, М.И. Евстигнеев. – М.: Машиностроение, 1974. – 256 с.
43. Сулима, А.М. Основы технологии производства газотурбинных двигателей: учебник / А.М. Сулима, А.А. Носков, Г.З. Серебренников. – М.: Машиностроение, 1996. – 480 с. – ISBN 5-217-02800-9.
44. Сулима, А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с. – ISBN 5-217-00060-0.
45. Суслов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А.Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 2000. – 300 с. – ISBN 5-217-02976-5.
46. Табенкин, А.Н. Текстура поверхности и её измерение. Шероховатость, волнистость, профиль, топография / А.Н. Табенкин, С.Б. Тарасов, С.Н. Степанов. – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2018. – 264 с. – ISBN 978-5-7422-6136-0.
47. Тихомиров, В.П. Влияние волнистости и шероховатости поверхности на нормальную контактную жесткость плоского стыка / В.П. Тихомиров, М.А. Измиров // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – № 12(85). – С. 4-12.

48. Филонов, И.П. Проектирование технологических процессов в машиностроении: учебное пособие / И.П. Филонов [и др.]; под общ. ред. И.П. Филонова. – Минск: УП «Технопринт», 2003. – 910 с. – ISBN 985-464-385-9.
49. Юдин, Д.Б. Линейное программирование (теория и конечные методы) / Д.Б. Юдин, Е.Г. Гольштейн. – М.: Физматгиз, 1963. – 775 с.
50. Ящерицын, П.И. Теория резания: учебник / П.И. Ящерицын, Е.Ф. Фельдштейн, М.А. Корниевич. – Минск: Новое знание, 2006. – 512 с. – ISBN 985-475-195-3.
51. helpiks.org/5-104468. Понятие оптимизации. Критерии оптимизации.
52. ГОСТ 2789-73 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – Введ. 1975–01–01. – М.: Стандартинформ, 2006. – 7 с.
53. ГОСТ 8908-81 Основные нормы взаимозаменяемости. Нормальные углы и допуски углов. – Введ. 1982–01–01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 10 с.
54. ГОСТ 24643-81 Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски формы и расположения поверхностей. Числовые значения. – Введ. 1981–07–01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 10 с.
55. ГОСТ 25307-82 Основные нормы взаимозаменяемости. Система допусков и посадок для конических соединений. – Введ. 1983–07–01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 24 с.
56. ГОСТ 25348-82 Основные нормы взаимозаменяемости. Единая система допусков и посадок. Ряды допусков, основных отклонений и поля допусков для размеров свыше 3150 мм. – Введ. 1983–07–01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 21 с.
57. ГОСТ Р 25346-2013 Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Система допусков на линейные размеры. Основные положения, допуски, отклонения и посадки. – Введ. 2015–07–01. – М.: Стандартинформ, 2019. – 41 с.
58. ГОСТ Р 25347-2013 Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Система допусков на линейные размеры. Ряды допусков, предельные отклонения отверстий и валов. – Введ. 2015–07–01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 59 с.
59. ГОСТ Р 53440-2009 Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Нормальные конусности и углы конусов. – Введ. 2012–01–01. – М.: Стандартинформ, 2019. – 11 с.
60. ГОСТ Р 53441-2009 Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Нормальные углы и углы призм. – Введ. 2012–01–01. – М.: Стандартинформ, 2019. – 11 с.

61. ГОСТ Р 53442–2015 Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Допуски формы, ориентации, месторасположения и биения. – Введ. 2017.07.01. – М.: Стандартинформ, 2020. – 96 с.
62. ГОСТ Р ИСО 4287-2014 Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности. – Введ. 2016–01–01. – М.: Стандартинформ, 2019. – 21 с.

Учебное издание

*Скуратов Дмитрий Леонидович,
Евдокимов Дмитрий Викторович,
Швецов Алексей Николаевич*

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА
И ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН
И АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ**

Учебное пособие

Редакционно-издательская обработка
издательства Самарского университета

Подписано в печать 27.12.2024. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печ. л. 6,5.

Тираж 120 экз. (1-й з-д 1–27). Заказ . Арт. – 30(Р2УП)/2024.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
443086, САМАРА, МОСКОВСКОЕ ШОССЕ, 34.

Издательство Самарского университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.