

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- ВСФ — высокоскоростное фрезерование
ОД — очаг деформации
СОЖ — смазочно-охлаждающая жидкость
СОТС — смазочно-охлаждающее технологическое средство
ПС — поверхностный слой
ППД — поверхностно-пластическое деформирование
ТОН — технологические остаточные напряжения
ТН — технологическое наследование
ТП — технологический процесс
ТС — технологическая система
ФС — фазовый состав
ШК — шлифовальный круг
УЗК — ультразвуковые колебания
УЗ — ультразвуковой (-ая, -ые)
УЗТВ — ультразвуковое твердосплавное выглаживание
УП — управляющая система
а. з. — абразивное зерно
Ез — затрачиваемая энергия, Дж
Ер(нА) — эффективность релаксации остаточных напряжений
на глубине поверхностного слоя h_A
К_н — коэффициент наследственности
Р — усилие прижима, Н
S — подача, мм/об
V — скорость выглаживания, м/мин
Vз — окружная скорость заготовки, м/мин
T_{пл} — температура плавления, К
T_p — температура релаксации, К
t — глубина резания, мм
ε_о, ε_у, ε_п — начальная суммарная, упругая, остаточная (пластическая) деформация, %
λ — коэффициент теплопроводности, Вт/мК
σв — предел прочности, МПа
σ₋₁ — предел выносливости, МПа
σ_{-1и} — предел выносливости образцов при отсутствии остаточных напряжений, МПа
σ_τ — остаточные напряжения после релаксации, МПа
σ_о — начальные остаточные напряжения, МПа

σ_{-z} , σ_{-x} , σ_y — касательные, осевые и радиальные технологические остаточные напряжения, МПа

τ — время релаксации, с

τ_b — продолжительность выглаживания, с

ВВЕДЕНИЕ

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

Развитие современной высокоскоростной транспортной и авиационно-космической техники сопряжено со все более увеличивающейся долей деталей, изготавливаемых из труднообрабатываемых материалов с особыми физико-механическими свойствами. К таким материалам относятся, в частности, высокопрочные стали, коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные стали, титановые, жаропрочные железоникелевые сплавы. Кроме них, в качестве конструкционных материалов для изготовления деталей высокоскоростных транспортных средств все большее распространение находят сравнительно легко обрабатываемые алюминиевые и другие легкие сплавы с низкой температурой плавления. Последнее вызывает необходимость тщательного учета влияния теплосилового напряженности процесса формообразования деталей из них при разработке технологии изготовления. Изготовление деталей из таких материалов сопряжено, как правило, с необходимостью обеспечения жестких требований к эксплуатационным свойствам детали, а значит, и к их геометрическим параметрам и физико-механическим свойствам поверхностных слоев материала. Однако методы технологического обеспечения этих свойств сопряжены с высокими энергетическими и временными затратами.

Ранее выполненными исследованиями установлено [7, 43], что на состояние поверхностного слоя детали оказывают влияние не только заключительные операции технологического процесса механической обработки заготовки, но и все предшествующие операции. Поэтому для обеспечения заданных эксплуатационных свойств ответственных деталей особый интерес вызывает рациональный учет процесса технологического наследования при их изготовлении, позволяющий формировать требуемые параметры качества поверхностного слоя еще на операциях технологического процесса, предшествующих окончательной обработке. Учет технологического наследования при проектировании технологических процессов особенно

важен для изготовления сложных по форме и тонкостенных нежестких деталей, количество которых в современной высокоскоростной технике из-за естественного желания уменьшить массу и инерционные нагрузки стремительно возрастает. В соответствии с ГОСТ 55145-2012 *нежесткая деталь* — это деталь, деформации которой в свободном состоянии превышают указанные на чертеже размерные и/или геометрические допуски. При этом *свободное состояние* — это состояние, при котором на деталь действует только сила тяжести.

Значительный вклад в развитие концепции и различных аспектов технологического обеспечения параметров качества поверхностных слоев ответственных деталей, в том числе и формируемых с учетом технологического наследования, внесен трудами В. Ф. Безъязычного, В. Ю. Блюменштейна, А. С. Васильева, А. М. Дальского, К. С. Колесникова, Б. А. Кравченко, А. А. Маталина, А. Г. Одинцова, В. М. Смелянского, А. М. Сулимы, А. Г. Сулова, М. Л. Хейфеца, Л. В. Худобина, П. И. Ящерицына и др.

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

Исследования, выполненные в последнее десятилетие на кафедре технологии машиностроения Ульяновского государственного технического университета, также свидетельствуют о высокой эффективности использования ультразвука для обеспечения требуемых значений целого ряда параметров качества заготовок из различных материалов [30–38, 41]: применение ультразвука при изготовлении деталей из труднообрабатываемых материалов позволяет существенно уменьшить требуемые усилия деформирования, снизить затраты на трение, значительно снизить величину остаточных напряжений без высоких временных и энергетических затрат, усилить проникающее действие смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС), релаксировать технологические остаточные напряжения. Последнее особенно эффективно при введении в технологический процесс операций поверхностно-пластического деформирования.

В настоящей работе особое внимание уделено таким важным параметрам качества поверхностного слоя деталей наземных и водных высокоскоростных транспортных средств и авиационно-космической техники, как глубина залегания, величина и знак технологических

остаточных напряжений и фазовый состав поверхностного слоя, формируемого на протяжении всего технологического процесса их изготовления. Рассмотрен процесс технологического наследования остаточных напряжений и фазового состава материала поверхностного слоя в ходе последовательно выполняемых технологических операций на примере изготовления деталей типа тел вращения (валов):

1) точение с продольной подачей, совмещенное с ультразвуковым твердосплавным выглаживанием, с последующим круглым наружным шлифованием с врезной подачей;

2) ультразвуковая релаксация остаточных напряжений после круглого наружного шлифования.

ГЛАВА 1

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ЗАГОТОВОК

1.1. Основные параметры качества ответственных деталей, изготовленных из труднообрабатываемых материалов

1.1.1. Классификация труднообрабатываемых материалов

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

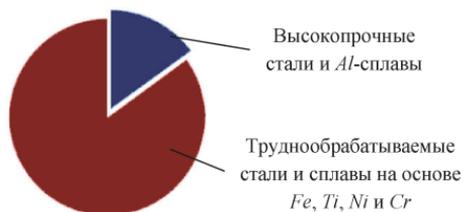


Рис. 1.1

Соотношение количества деталей из различных сталей и сплавов в конструкции авиадвигателей 4-го поколения [26]

Одним из самых распространенных подходов к классификации конструкционных материалов является использование теории С. Н. Корчака, предложившего использовать в качестве критерия обрабатываемости толщину среза при заданной удельной радиальной составляющей силы шлифования [46]. С. Н. Корчак разработал расчетную модель обрабатываемости, учитывающую ряд факторов: силу резания, характеристику шлифовального круга, физико-механические свойства обрабатываемого материала. Однако предложенная им классификация включает в себя только различные марки сталей, в то время как для разделения остальных труднообрабатываемых материалов (например, титановых и жаропрочных сплавов) на группы требуется провести дополнительные трудоемкие расчеты.

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

1. Теплостойкие хромистые, хромникелиевые и хроммолибденовые стали перлитного, мартенситно-ферритного и мартенситного классов типа 20X3MВФ, 15X6CЮ, 34XНЗМ и др.

2. Коррозионностойкие хромистые и сложнолегированные стали ферритного, мартенситно-ферритного и мартенситного классов, представителями которых являются стали 20X13, 40X13, 14X17H2, 95X18, 11X11H2BMФ и др.

3. Коррозионностойкие, кислотостойкие, жаростойкие хромникелиевые стали аустенитного, аустенитно-ферритного и аустенитно-мартенситного классов типа 12X18H10T, 20X23H18, 07X16H6 и др.

4. Жаропрочные, жаростойкие, кислотостойкие хромникелиевые, хромникелемарганцовистые сложнолегированные стали аустенитного и аустенитно-ферритного классов. Типичными представителями данной группы труднообрабатываемых материалов являются стали 10X11H23T3MP, 12X25H16Г7AP, 15X18H12C4TЮP и др.

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

6. Окалийностойкие и жаропрочные литейные сплавы на никелевой и хромовой основах.

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

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

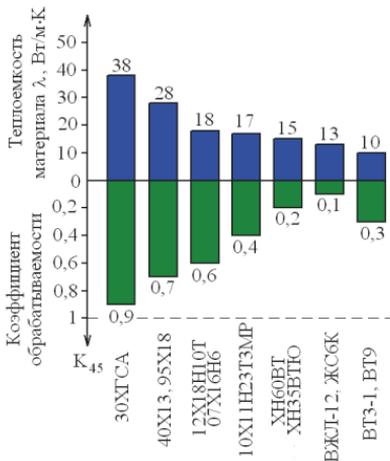


Рис. 1.2

Свойства наиболее распространенных труднообрабатываемых сталей и сплавов

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

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

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

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

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

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

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

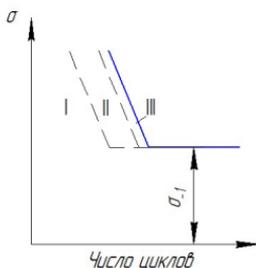


Рис. 1.3

Кривая усталости [64]:

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

Установлено, что для конструкционных углеродистых и низколегированных сталей предел выносливости при изгибе, как правило, составляет половину от предела прочности [73]:

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

Для высокопрочных сталей [77]:

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

Для цветных сплавов [77]:

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

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

Согласно [61], поверхностный слой (ПС) — это наружный слой детали с измененными структурой, фазовым и химическим составом по сравнению с основным металлом, из которого сделана деталь (рис. 1.4).

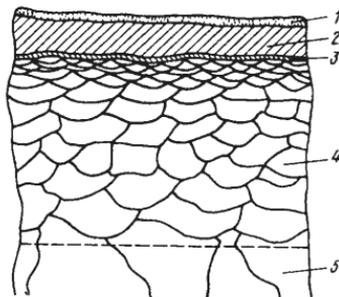


Рис. 1.4

Схема поверхностного слоя детали [60]:

1 — адсорбированная зона; 2 — зона оксидов; 3 — граничная зона материалов; 4 — зона материала с измененными физико-механическими свойствами; 5 — зона материала с неизменными свойствами.

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

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

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

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

В процессе механической обработки ПС заготовки подвергается неоднородной пластической деформации, затухающей на глубине [75]. Пластическое деформирование сопровождается структурными изменениями в металле ПС. В кристаллической решетке возрастает количество дислокаций, вакансий и других дефектов решетки, ПС упрочняется вследствие наклепа, формируются сжимающие остаточные напряжения. Изменяется форма и размеры зерен, которые измельчаются и вытягиваются у поверхности, ориентируясь в направлении силы деформирования.

С другой стороны, многие операции технологического процесса изготовления деталей (шлифование, тонкое точение, высокоскоростное фрезерование и др.) сопряжены со значительным теплообразованием в зоне контакта инструмента с заготовкой, что может стать причиной активизации структурно-фазовых преобразований, разупрочнения металла вследствие процессов отпуска, а также формирования в ПС заготовки нежелательных технологических остаточных напряжений. Указанные процессы в наибольшей степени характерны для формообразования тонкостенных нежестких деталей.

Одним из важнейших физико-механических параметров ПС являются технологические остаточные напряжения (ТОН), возникающие в процессе механической обработки и обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД). Известно, что ТОН часто оказывают определяющее влияние на износостойкость, усталостную прочность и коррозионную стойкость [2, 13, 18, 59, 60, 75].

В зависимости от размеров и объемов тела, в которых оценивают ТОН, они условно подразделяются на [59]:

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

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

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

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

По мнению И. А. Одингa, остаточные напряжения сжатия нарушают симметрию цикла при среднем напряжении сжатия, что приводит к повышению предела выносливости, и наоборот — остаточные напряжения растяжения создают асимметричный цикл при среднем напряжении растяжения, при котором снижается предел выносливости [64].

В работе [79] определяли степень влияния ТОН на усталостную прочность круглых образцов из жаропрочного сплава ХН35ВТЮ и титанового сплава ВТЗ-1. Результаты исследований приведены в табл. 1.1, из которой следует, что растягивающие остаточные напряжения понижают предел выносливости, а сжимающие — способствуют его увеличению.

Степень влияния касательных напряжений на предел выносливости примерно одинакова и может быть выражена зависимостью [79]:

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

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

Согласно исследованиям [79], предел выносливости цилиндрических полированных образцов из сплава ХН77ТЮР, на поверхностях которых отсутствуют наклеп и остаточные напряжения, составил 380 МПа. При этом изменение предела выносливости в зависимости от величины остаточных напряжений для образцов из сплава ХН77ТЮР выражается зависимостью

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

Таблица 1.1

Касательные остаточные напряжения и предел выносливости [79]

Обрабатываемый материал заготовок	Касательные остаточные напряжения σ_z , МПа	Предел выносливости σ_{-1} , МПа
ВТЗ-1	-40	42
	-30	40
	-20	38
	+60	25
	—	23
ХНЗ5ВТЮ	+109	16
	+82	20
	+42	25
	-85	42

Приведенные данные, а также ряд других исследований [92, 97] свидетельствуют о превалирующем влиянии остаточных напряжений на изменение предела выносливости.

Анализ научной литературы показал, что наклеп оказывает неоднозначное влияние на предел выносливости образцов. Исследованиями [64] установлено, что для жаропрочных сплавов при небольших степенях наклепа (3–10%) и глубине упрочнения 10–20 мкм происходит рост прочностных свойств, который обусловлен снижением неоднородности дефектов и формированием благоприятной микроструктуры. Дальнейший рост упрочнения снижает пластичность сплавов, уменьшает трещиностойкость и, как следствие, ведет к существенному снижению усталостной прочности [95, 96].

Наклеп ПС заготовки методом обкатывания значительно повышает усталостную прочность титановых сплавов (табл. 1.2). Результаты испытаний свидетельствуют, что применение обкатывания повышает предел выносливости образцов из сплава ВТЗ-1 до 34%. Повышение предела выносливости объясняется формированием не только сжимающих остаточных напряжений, но и оптимальным наклепом [102]. Обкатывание с силой более 750 Н уменьшает усталостную прочность вследствие перенаклепа [65].

Таблица 1.2

Результаты усталостных испытаний образцов из сплава ВТЗ-1 [65]

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

Таким образом, чрезмерная величина наклепа, приводящая к разупрочнению металла поверхностного слоя, может стать причиной возникновения усталостной трещины. Однако упрочнение ПС до состояния, при котором сохраняются его пластические свойства, способствует повышению усталостной прочности [84].

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

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

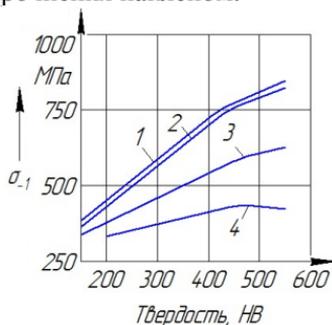


Рис. 1.5

Изменение предела выносливости образцов в зависимости от твердости и метода обработки [64]:

1 — шлифование и упрочнение наклепом; 2 — наклеп дробью; 3 — токарная обработка; 4 — шлифование.

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

Структурные изменения металла при механической обработке (например, прижоги) заготовок являются причиной снижения усталостной прочности деталей машин. При этом на границах участков измененной структуры образуются шлифовочные трещины, являющиеся концентраторами напряжений [72]. Предел выносливости образцов из стали 40X с прижогом значительно ниже по сравнению с образцами без прижога (рис. 1.6).

Структурно-фазовый состав оказывает существенное влияние на долговечность и износостойкость ПС. При обработке заготовок из

Конец ознакомительного фрагмента.
Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru