

В предложенной методике используются основные принципы известного метода по определению напряжений в наплавляемом образце при возникновении горячих трещин при температурах, близких к линии солидуса [6] (схема нагружения, использование упругого элемента, растягивающая нагрузка при наплавке и др.).

За критерий технологической прочности наплавляемого металла принимают максимальную деформацию образца в температурном интервале хрупкости при установленном значении растягивающей нагрузки, когда горячие трещины в наплавленном металле не образуются.

### Литература

1. Пат. 2483120 Российская Федерация, МПК С 21 D 8/00, С 21 D 9/22, С21 D 7/13. Способ упрочнения наплавленной быстрорежущей стали / Барчуков Д.А. [и др.]. Оpubл. 27.05.2013, Бюл. № 15. 4 с.
2. Барчуков Д.А. Ресурсосберегающая технология изготовления резьбового резца с упрочненной режущей частью / Научное обозрение. 2012. № 5. С. 404 – 407.
3. Лаврентьев А.Ю. Изменение структуры и свойств зоны термического влияния при изготовлении наплавленного инструмента из быстрорежущих сталей / А.Ю. Лаврентьев, А.М. Дождев, Д.А. Барчуков // Известия Юго-Западного государственного университета. 2014. №5 (56). С. 14 – 20.
4. Сварка в машиностроении. Справочник в 4 томах. Том 3. / Под ред. В.А. Винокурова. М.: «Машиностроение», 1979. 567 с.
5. Николаев Г.А. Сварные конструкции. Расчет и проектирование / Г.А. Николаев, В.А. Винокуров. М.: «Высшая школа», 1990. 446 с.
6. Прохоров Н.Н. Горячие трещины при сварке. М.: Машгиз, 1952. 224 с.

### ***Долговечность машиностроительной продукции***

д.т.н. проф. Зинченко В.М., к.т.н. проф. Маневский С.Е., к.т.н. доц. Прохорова А.И.  
*Университет машиностроения*  
8 (495) 223-05-23, доб. 15-51, [kafmaterialy@mail.ru](mailto:kafmaterialy@mail.ru)

*Аннотация.* В статье отмечается, что при производстве детали необходима комплексная оценка на основе технологической наследственности по ходу всего процесса её изготовления. В результате реализации принципов инженерии поверхности разработана новая система показателей, включающая как известные, так и новые показатели и критерии.

*Ключевые слова:* структура, свойства, заготовки, детали, критерии, технологическая наследственность, инженерия поверхности.

### **Введение**

Цель любого производства – изготовление изделий стабильно высокого качества.

Однако, на практике наблюдается значительный разброс эксплуатационных свойств объектов производства. Большинство деталей, узлов, агрегатов сложных изделий, например, автомобилей, тракторов, станков, надёжно и длительно работают, но часть деталей из-за недостаточной прочности разрушаются преждевременно. Таким образом, на производстве по одной технологической документации на одном и том же оборудовании изготавливают одновременно детали с разным качеством: высоким и низким. Причём срок службы одноимённых деталей может отличаться существенно, например, для автомобильных зубчатых колёс в 8 – 10 раз [1].

Поэтому перед машиностроителями остро стоит проблема повышения качества деталей, но не всех, а только некоторой части. Это значит, что перед производством стоит задача стабилизации качества производимых деталей за счёт уменьшения доли деталей, обладаю-

щих низкими свойствами.

Для устранения причин, приводящих к разбросу свойств объектов производства необходимо исследовать не только процессы на отдельных этапах изготовления (ковка, литьё, механическая обработка, термическая обработка), но и устанавливать связи между отдельными технологическими операциями. То есть в современных условиях требуются общая и комплексная оценки всего процесса изготовления изделий на основе технологической наследственности, которая позволяет изучать последовательно все процессы, происходящие в металле, заготовках, деталях по ходу всего процесса изготовления изделий.

Обычно детали, обладающие параметрами, установленными нормативно-технической документацией, надёжно и длительно работают при эксплуатации изделий. Однако довольно часто встречаются случаи, когда детали, параметры которых соответствуют технической документации, разрушаются преждевременно. Поэтому для стабилизации свойств деталей необходимо уточнять как состав параметров и показателей качества, их значения, так и обоснованные связи между ними.

Такое уточнение в настоящее время выполняют на основе инженерии поверхности, под которой понимают совокупность методов целенаправленного формирования микрогеометрии, структуры поверхностного слоя с учётом его свойств и свойств сердцевины деталей, а также условий эксплуатации. Для успешного применения методов инженерии поверхности необходимо исследовать изменения химического состава, напряжённого состояния структуры поверхностного слоя и сердцевины объекта, макро- и микрогеометрии обработанных поверхностей.

### **Технологическая наследственность**

В технологии машиностроения в 60-е – 70-е годы прошлого столетия выполнены многочисленные работы по исследованию зависимости свойств изделий от технологических методов их изготовления [2 – 6]. В результате этих работ коренным образом изменили взгляд на способы достижения стабильно высокого качества изделий. Раньше исключительную роль при разработке мер повышения эксплуатационных свойств деталей за счёт улучшения качества поверхности и поверхностного слоя деталей отводили финишным операциям (шлифованию, полированию, поверхностному пластическому деформированию и др.). Считали, что финишные операции в любом случае, независимо от других технологий, используемых при изготовлении этих деталей, обеспечат всегда высокое качество объекта производств.

Выполненные исследования показали существенное влияние на результаты финишных операций и эксплуатационные свойства изделий предшествующих технологических процессов (ковка, термическая обработка поковок, операций при черновой механической обработке).

В результате этих работ было установлено, что при производстве изделий существует технологическая наследственность, которая отражает зависимость результатов последующих операций от результатов предыдущих и зависимость эксплуатационных свойств от этого. Эксплуатация показывает, что каждая деталь обладает своей технологической наследственностью. Детали, которые надёжно и длительно работают при эксплуатации, обладают положительной технологической наследственностью, а детали, которые разрушаются преждевременно – отрицательной. Учитывая актуальность дальнейшего повышения надёжности и долговечности деталей машин необходимо расширить и углубить исследования по обеспечению положительной технологической наследственности и предотвращению формирования отрицательной, т.е. исключить нежелательные отклонения в передаче структурно-напряжённого состояния объекта производства от предыдущих позиций обработки на последующие.

Начало процесса изготовления деталей находятся в заготовительных цехах, когда кузнецы штучной заготовке, а литейщики определённому объёму жидкого расплава придают необходимые размеры и форму. Это первое проявление технологической наследственности на машиностроительном предприятии, которое определяет весь комплексный технологиче-

ский процесс изготовления деталей: мерная штучная заготовка из проката и мерный объём жидкого металла наследуют размеры с припусками и форму деталей. С этого момента их материал обладает свойствами, формируемыми конкретными размерами и формой заготовок. Причём свойства материала в разных местах заготовок могут быть разными в зависимости от толщины сечений.

С момента своего появления заготовка становится носителем технологической информации о всех воздействиях на её поверхности и превращениях в её материале, осуществляемых в интересах процесса изготовления объекта производства.

В результате сложного термического и механического воздействия на металл в процессе изготовления поковок в них формируется сложное структурно-напряжённое состояние. Поплавочное колебание химического состава стали, неравномерность пластической деформации в объёме поковок, неодинаковые условия охлаждения поковок в таре приводят к значительному разнообразию микроструктуры и фазового состава металла поковок. В зависимости от легирования в микроструктуре поковок одновременно присутствуют различные составляющие: перлит, феррит, карбиды, бейнит. На практике в поковках наблюдаются различные степени обезуглероживания поверхностного слоя, разнотерность, полосчатость. В поковках возникают остаточные напряжения, неравномерность распределения твердости. Отмеченные неоднородности (химическая, структурная, технологическая) отрицательно влияют на формирование положительной технологической наследственности: они затрудняют получение положительных результатов при механической обработке, окончательной термической и химико-термической обработки деталей и снижают эксплуатационные свойства деталей. Поэтому существует необходимость совершенствования технологии изготовления заготовок. Важность этой работы объясняется тем, что на этой стадии закладываются основы технологической стабильности окончательных структур и свойств деталей.

Очень важное место в формировании технологической наследственности принадлежит термической обработке заготовок. Для устранения дефектов микроструктуры, снижения остаточных напряжений, уменьшения твердости, улучшения обрабатываемости при механической обработке, а также повышения механических свойств отливки и поковки подвергают различным видам термической обработки. Такая обработка называется предварительной (смягчающей), в отличие от заключительной (упрочняющей), которая предназначена для придания деталям окончательных эксплуатационных свойств.

Считают, что большинство дефектов, отрицательно влияющих на технологическую наследственность деталей, во время термической обработки устраняется [3].

Однако это не всегда соответствует действительности в полной мере: и после термической обработки остаются колебания в прокаливаемости материала поковки, наблюдаются неблагоприятные соотношения микротвердостей структурных составляющих, наличие карбидных включений, что существенно затрудняет механическую обработку при изготовлении деталей.

При механической обработке в поверхностных слоях деталей в результате пластической деформации, нагрева и охлаждения происходит изменение структуры стали, сопровождающееся наклепом металла и возникновением остаточных напряжений. Так, в случае наличия различных структурных составляющих, различные микрообъемы металла упрочняются неодинаково: перлит, сорбит, троостит в меньшей степени, феррит, аустенит в большей.

Наклеп оказывает заметное влияние на механические свойства деталей и точность их размеров, т.к. в процессе последующей термической обработки и при хранении под действием остаточных напряжений может происходить изменение размеров и формы деталей.

На степень наклепа и его равномерность существенно влияет состояние режущего инструмента. Например, при изготовлении цилиндрических зубчатых колес из стали 12Х2Н4А посадочное отверстие сужается в среднем на 26 % больше в случае обработки затупленным инструментом, чем при использовании нового; бочкообразность отверстия при затупленном

инструменте (сужение вверху 170 мкм, внизу – 209 мкм) происходит, а при новом практически отсутствует (сужение вверху 154 мкм, внизу – 147 мкм); при затуплении инструмента увеличивается разброс значений диаметра отверстия: среднее квадратическое отклонение при обработке новым инструментом равно 110 мкм, а при затупленном – 143 мкм [6].

Технологическая наследственность на стадии упрочнения деталей зависит как от факторов, действующих на предыдущих стадиях изготовления деталей, так и от факторов, действующих при осуществлении процессов упрочнения. Наиболее существенно влияние колебания химического состава сталей и конструктивных особенностей деталей.

Так, при закалке цементованных зубчатых колес ( $m = 4$  мм) вершины зубьев охлаждаются в 2 раза быстрее впадин и в 6 – 8 раз быстрее посадочного отверстия. Это приводит к различию толщин упрочненного слоя: на вершине зубьев оно равно 0,8 – 0,85 мм, на рабочей поверхности 0,75 – 0,80 мм, в посадочном отверстии 0,45 – 0,60 мм.

Характерным примером отрицательной наследственности при структурных и фазовых превращениях в цементованных и нитроцементованных деталях являются дефекты в поверхностных слоях (карбиды, оксиды, немартенситные структуры, темная составляющая), которые приводят к заметному снижению усталостной прочности и износостойкости таких деталей. Технологическим приемом предотвращения такого отрицательного наследования являются программируемые режимы диффузионного насыщения деталей углеродом и азотом [1, 7].

Так, если при нитроцементации рулевых червяков (сталь 35Х) по обычным режимам в микроструктуре поверхностного слоя образуется троостит, то при использовании режима с повышением углеродного потенциала образуется качественная мартенситно-аустенитная микроструктура.

Такое изменение микроструктуры в тонком поверхностном слое (0,02 – 0,04 мм) весьма положительно влияет на наследственность. Образование троостита в слое приводит к существенному снижению микротвердости, вызывает концентрацию напряжений, а также исключают положительное влияние ППД, т.к. в этом случае не происходит наклепа такой структуры. Образование мартенситно-аустенитной микроструктуры сопровождается значительным повышением усталостной прочности червяков рулевого управления: число циклов до разрушения повышается от  $0,45 \cdot 10^6$  до  $1,2 \cdot 10^6$ , т.к. такая микроструктура обладает более высокой твердостью и под действием дробеструйной обработки существенно упрочняется. При этом создаются остаточные напряжения сжатия. Данный пример весьма показателен: нитроцементация деталей с образованием дефектной микроструктуры делает неэффективной последующую технологию упрочнения колес ППД. Нитроцементация по другому режиму диффузионного насыщения деталей углеродом и азотом, предотвращает образование дефектных структур, обеспечивает формирование качественной микроструктуры, которая позволяет реализовать в полной мере эффективность дробенаклепа. Получается, что при одном сочетании технологий проявляется отрицательная наследственность, при другом – положительная.

Режимы насыщения при цементации, нитроцементации и азотировании существенно влияют на качество микроструктуры поверхностных слоев деталей и их свойства, в том числе и геометрическую точность. Совершенствуя их, можно эффективно управлять технологической наследственностью деталей.

### **Инженерия поверхности**

Другим комплексным направлением достижения высокого качества и надежности продукции является инженерия поверхности, включающая ряд научных дисциплин: физику и химию поверхности твердого тела, физику и химию взаимодействия поверхностных слоев и управление их свойствами, технологию покрытий и модифицирования поверхностных слоев; технологию поверхностной обработки [1, 7 – 10].

Однако инженерия поверхности для традиционных видов обработки деталей не только

новый термин, но и новый методологический подход к исследованиям и разработкам, направленным на повышение свойств деталей, основанный на инженерных расчетах, инженерных зависимостях, увязывающих в единую систему различные показатели и критерии конструкторского и технологического характера. Под этим термином следует понимать совокупность инженерных методов формирования структуры и свойств поверхностных слоев деталей и инструментов.

Основной особенностью инженерии поверхности является решение всех технологических задач под диктатом условий эксплуатации деталей. При реализации метода инженерии поверхности необходимо выполнить последовательно несколько взаимозависимых этапов.

Уточнение условий нагружения деталей при их эксплуатации. При этом необходимо учитывать максимально возможный спектр нагрузок, т.к. действия некоторых, несмотря на их кратковременность, могут привести к достижению критического состояния материала деталей. На этом этапе следует определить поле напряжений.

Затем на основе зависимости «структура-свойства» необходимо определить показатели оценки качества деталей. При этом следует определить характер распределения структуры и фаз по зонам деталей в связи с условиями нагружения, т.е. определить поле сопротивления.

Следующий этап – разработка технологических процессов обработки, обеспечивающих достижение требуемых структур, фаз и свойств в различных зонах деталей. Здесь необходимо учитывать особенности промышленных технологических процессов обработки. На этой стадии должно быть обеспечено согласование поля сопротивления (структурно-напряженного состояния деталей) с полем напряжения (напряженно-деформированным состоянием ее). Конечной целью является формирование композиционной структуры по сечению деталей (поверхностного слоя, сердцевины); управление величиной этих зон, в том числе и по контуру деталей; оптимизация соотношения между свойствами слоя и сердцевины деталей.

Реализация принципов инженерии поверхности была осуществлена на примере цементованных и нитроцементованных зубчатых колес [1].

При уточнении условий нагружения зубчатых колес установлено, что впадина между зубьями является очень ответственной зоной, так как от свойств материала в этом месте зависят и контактная и усталостная прочность зубьев (обычно считали, что сопротивление выкрашиванию обеспечивается структурой поверхностного слоя в зоне начальной окружности). Это заставляет уделять большее внимание упрочнению этой зоны зубчатых колес. Тем более, что при максимальном нагружении зубьев в зоне перехода от эвольвентного профиля к впадине между зубьями эта зона имеет минимальное упрочнение из-за наличия в ней дефектов микроструктуры и меньшей толщины упрочненного слоя.

При разработке системы показателей оценки свойств зубчатых колес определены основные показатели, определяющие прочность и долговечность зубчатых колес в зависимости от условий их нагружения при эксплуатации. В условиях контактной выносливости это эффективная толщина слоя во впадине и микротвердость тонкой (до 100 мкм) поверхностной зоны на этом участке профиля зубьев, а в условиях циклической и статической изгибной прочности – эффективная толщина слоя во впадине и микротвердость сердцевины зуба. Однако отдельное их использование не обеспечивает высокой надежности оценки, так как степень корреляции их с долговечностью и прочностью равна 0,67 – 0,77.

Повышение надежности оценки осуществляется при использовании новых критериев. При оценке контактной прочности используется одновременно твердость поверхностного слоя во впадине и эффективная толщина слоя в этом месте:

$$K_H = H_{вп} \cdot h_{вп} ,$$

где:  $H_{вп}$  – микротвердость поверхностной зоны во впадине;

$h_{вп}$  – эффективная толщина слоя в этом месте.

Достоверность оценки долговечности в этом случае достигает 0,915.

Для более точной оценки усталостной прочности зубьев применен критерий  $K_F$ , равный произведению двух показателей, которые оказывают наиболее существенное влияние при этих условиях нагружения: толщины упрочненного слоя во впадине ( $h_{\text{вп}}$ ) и микротвердость сердцевины зуба ( $H_{\text{серд}}$ ):

$$K_F = H_{\text{серд}} \cdot h_{\text{вп}}.$$

Достоверность оценки долговечности и в этом случае значительно повышается.

Новые критерии  $K_n$  и  $K_F$  показывают, что основные показатели оценки свойств зубчатых колес должны находиться в динамическом равновесии: изменение одних должно сопровождаться изменением других. Например, при упрочнении зубчатых колес коробок передач из стали 15ХГН2ТА для повышения долговечности необходимо было увеличить толщину слоя, во втором случае, при упрочнении ведомых зубчатых колес ведущего моста автомобиля из стали 23ХН2М, из-за высокой твердости сердцевины зубьев необходимо было уменьшить толщину упрочненного слоя.

Приведенные примеры показывают, что новые критерии позволяют согласовывать взаимодействия слоя и сердцевины, что способствует стабилизации высоких значений прочности и долговечности зубчатых колес.

В результате реализации принципов инженерии поверхности разработана новая система показателей, включающая как известные, так и новые показатели и критерии: твердость слоя и сердцевины, эффективную толщину слоя во впадине, количество остаточного аустенита в поверхностном слое, содержание азота в нитридах и в порах (молекулярного), содержания углерода, углерода и азота в твердом растворе. Предложенная система показателей оценки свойств тяжело нагруженных зубчатых колес позволяет более надежно прогнозировать прочность и долговечность этих деталей.

К технологическому обеспечению требований уточненной системы показателей оценки свойств зубчатых колес относятся:

- создание многозонной (композиционной) структуры по сечению деталей;
- управление величиной этих зон по контуру зубчатого венца;
- оптимальное соотношение между свойствами поверхностных слоев и свойствами сердцевины зубов;
- предотвращение образования дефектов микроструктуры (троостита, оксидов, темной составляющей);
- стабильность микротвердости сердцевины;
- осуществлено разработкой и применением новых режимов цементации и нитроцементации с программируемым изменением углеродного и азотного потенциалов при диффузионном насыщении стальных деталей.

Комплексное использование системы показателей оценки свойств деталей и новых режимов химико-термической обработки позволило повысить долговечность зубчатых колес в среднем в 1,5 – 2,0 раза.

При выявлении причин различных отклонений в микроструктуре и свойствах деталей необходимо исследовать строение и свойства исходного металла, заготовок и деталей, выяснять условия и процессы формирования этих структур и свойств на протяжении всего цикла изготовления деталей. При этом происходит неоднократная перестройка структуры, а значит и изменения всех структурно чувствительных свойств материала готовых деталей. Одной из важнейших задач является определение и учет общих закономерностей изменения свойств деталей от влияния предыдущих состояний материала в связи с его обработкой на всех этапах изготовления деталей, то есть его технологической наследственности.

Общей основой технологической наследственности являются фазовые и структурные превращения в металле, происходящие в результате различных воздействий на него в тече-

### Заключение

В настоящее время невозможно добиться стабильного успеха без тщательных исследований и совершенствования всего производства изделия в целом. Это требует применения новых методологических решений. Если раньше очень часто успеха достигали при решении проблем в отдельных технологиях (производстве стали, изготовлении заготовок, механической обработке резанием, термической и химико-термической обработке), то в настоящее время этого уже явно недостаточно.

Сейчас нужны не сумма отдельных технологий, а комплекс технологий, обеспечивающий благоприятное взаимовлияние этих технологий на эксплуатационные свойства изделий. Необходимо учитывать и исследовать весь технологический процесс изготовления изделий. Лучше всего вести работы в интересах повышения производственной наследственности, когда наряду с основными технологическими процессами учитываются также вспомогательные и организационные. Именно такой подход может обеспечить и постоянство свойств изделий и требуемую эксплуатационную наследственность, необходимую для обеспечения длительной и надежной работы техники.

Развитие инженерии поверхности свидетельствует о необходимости более надежной оценки показателей качества продукции, более обоснованного назначения этих показателей с учетом их взаимодействия в общей оценке свойств объектов производства.

### Литература

1. Зинченко В.М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001, 303 с.
2. Дальский А.М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. М.: Машиностроение, 1975, 223 с.
3. Ящерицын П.И., Рыжов Э.В., Аверченков В.И. Технологическая наследственность в машиностроении. Минск: Наука и техника, 1977, 256 с.
4. Ящерицын П.И., Скорынин Ю.В. Технологическая и эксплуатационная наследственность и ее влияние на долговечность машин. Минск: Наука и техника, 1978, 120 с.
5. Технологические основы обеспечения качества машин / К.С. Колесников, Г.Ф. Баландин, А.М. Дальский и др.; под общ.ред. К.С.Колесникова. – М.: Машиностроение, 1990, 256 с.
6. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / А.М. Дальский, Б.М. Базров, А.С. Васильев и др.; под ред. А.М. Дальского. М.: Изд-во МАИ, 2000, 364 с.
7. Зинченко В.М., Маневский С.Е., Прохорова А.И. Современные направления стабилизации прочности и долговечности машиностроительной продукции / Технология металлов, 2012, № 10, с. 12 – 18; № 11, с. 25 – 30.
8. Харламов Ю.А. Инженерия поверхности и развитие современного машиностроения / Тяжелое машиностроение, 2001, № 2, с. 2 – 7.
9. Суслов А.Г. Формирование учения об инженерии поверхности деталей и направления его дальнейшего развития / Вестник Брянского государственного университета, 2005, № 1(5), с. 48 – 68.
10. Инженерия поверхности деталей / Под ред. Суслова А.Г. – М.: Машиностроение, 2008, 320 с.