

ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ НАСЛЕДСТВЕННОСТЬ

© 2010 И.И.Усольцева

Самарский государственный технический университет

Поступила в редакцию 12.11.2010

Выполнен анализ закономерностей наследования свойств поверхностного слоя при его технологическом конструировании.

Ключевые слова: *поверхностный слой, качество, технологическая наследственность, коэффициент передачи, усталостная долговечность*

Эксплуатационные свойства машин и деталей относятся к обобщающим характеристиками качества и определяются состоянием их поверхностного слоя (ПС), поэтому обеспечение заданных параметров качества ПС изделий, отвечающих их условиям эксплуатации, является первоочередной задачей машиностроительного производства. Инженерия поверхностных слоев объединяет явления, протекающие как на поверхности, так и в ПС деталей, что позволяет направленно формировать свойства ПС на каждом этапе их процесса изготовления. Для управления условиями формирования положительных с точки зрения эксплуатации свойств ПС и их трансформацией по мере выполнения операций технологического процесса (ТП) необходимы знания закономерностей технологической наследственности (ТН), количественная сторона которой характеризуется коэффициентом передачи K .

Для информационного обеспечения процесса управления ТН проведен анализ изменений свойств ПС при выполнении операций финишной обработки деталей шасси, работающих в условиях усталостного нагружения. Инженерия ПС позволяет рассматривать их качество как трехуровневую иерархическую систему взаимосвязанных показателей, включающую: функциональное качество – усталостную долговечность N (предел выносливости σ_{-1}); системное качество – плотность скрытой энергии в исходном состоянии U_{e0} и коэффициент перенапряжения на межатомных связях k_{σ} ; материально-вещественные качества – микротвердость HV , остаточные напряжения $\sigma_{ост}$ и шероховатость R_a ПС [1]. Установлено [2], что усталостная долговечность локального объема материала определяется его структурным состоянием, характеризуемым параметрами U_{e0} и

k_{σ} , внешними эксплуатационными напряжениями, величина которых корректируется в зависимости от уровня $\sigma_{ост}$ и R_a , и энергией активации процесса разрушения. В свою очередь, найдены зависимости параметров U_{e0} и k_{σ} от твердости по Виккерсу (микротвердости). Численный анализ уравнения долговечности, приведенного в работе [2], показал, что при технологическом конструировании ПС необходимо стремиться к достижению оптимального с точки зрения усталостной долговечности структурного состояния, которое характеризуется наименьшими значениями параметров U_{e0} и k_{σ} , R_a и наибольшими величинами остаточных напряжений сжатия $\sigma_{ост}$ и глубины их распространения h_{μ} .

Исследования ТН проводились на стандартных усталостных образцах из высокопрочной стали 30ХГСН2А ($\sigma_s=1700$ МПа), обработанных по различным вариантам ТП, включающим операции: шлифование (Шл), стабилизирующий отпуск (СтО), тонкое точение (ТТ), алмазное выглаживание (АВ), суперфиниширование (Сф), деформационно-циклическое упрочнение (ДЦУ). Эффективность ТН оценивалась коэффициентами передачи K перечисленных выше наследуемых свойств ПС (см. табл. 1, 2). Считалось, что как при увеличении положительных свойств, так и при уменьшении отрицательных свойств коэффициент передачи имеет значение $K>1$ и ТН носит благоприятный характер.

Установлено, что коэффициенты передачи параметра k_{σ} при исходной обработке Шл ведут себя не стабильно: уменьшаются до значений $K<1$ после СтО и Сф и значительно увеличивается до $K>1$ после АВ (табл. 1). В тоже время отрицательное влияние параметра U_{e0} сначала ослабевает, затем усиливается. Растягивающие остаточные напряжения, возникшие после Шл и отрицательно влияющие на усталостную долговечность, переформируются в благоприятные сжимающие на операции Сф и усиливаются АВ.

Усольцева Ирина Ивановна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация производств и управление транспортными системами». E-mail: samgtu_uii@mail.ru

Таблица 1. Коэффициенты передачи K наследуемых свойств ПС при последовательности технологических операций Шл, СтО, Сф, АВ и ДЦУ

Технологические операции	Наследуемые свойства ПС					
	$\sigma_{ост}$, МПа	R_a , мкм	U_{e0} , МДж/м ³	k_σ	h_μ , мм	σ_{-1} , МПа
Шл (исх)	300	0,61	5320	31,59	0,08	530
Коэффициенты передачи K						
СтО	-0,67	1,00	1,02	0,92	1,00	1,13
Сф	0,67	2,25	1,01	0,96	1,00	1,28
АВ	3,00	3,25	0,85	1,23	3,00	1,47
ДЦУ	0,00	3,25	0,84	1,31	3,40	1,60

Таблица 2. Коэффициенты передачи K наследуемых свойств ПС при последовательности технологических операций ТТ, Сф, АВ и ДЦУ

Технологические операции	Наследуемые свойства ПС					
	$\sigma_{ост}$, МПа	R_a , мкм	U_{e0} , МДж/м ³	k_σ	h_μ , мм	σ_{-1} , МПа
ТТ (исх)	-450	0,69	5450	31,25	0,10	800
Коэффициенты передачи K						
Сф	1,15	2,50	0,98	1,05	1,00	1,04
АВ	2,75	3,50	0,88	1,16	3,50	1,16
ДЦУ	0,00	3,50	0,88	1,23	4,00	1,23

В вариантах ТП, включающих ТТ, Сф, АВ, изменение коэффициентов передачи от предшествующих к последующим операциям носит монотонный характер (табл. 2). Наблюдается усиление всех благоприятно влияющих на долговечность свойств ПС, полученных после ТТ (кроме параметра U_{e0}), чему соответствуют $K > 1$ на всех операциях. Независимо от исходного вида обработки, при проведении ДЦУ, состоящего из циклической тренировки (ЦТ) при напряжениях выше предела выносливости и последующего низкотемпературного отпуска (НО), наследуются не только показатели качества ПС, сформированные в процессе поверхностного пластического деформирования АВ, но и упрочняется предполагаемая зона зарождения трещины путем увеличения глубины залегания остаточных напряжений h_μ и уменьшения параметра k_σ (все $K > 1$) при сохранении коэффициентов передачи параметров U_{e0} и R_a . Несмотря на различие в поведении коэффициентов передачи, как в варианте с исходной операцией Шл, так и при ТТ, наблюдается повышение предела выносливости от предшествующих операций к последующим, однако наиболее благоприятным ТП, когда отрицательные свойства не возникают, являются варианты обработки, включающие ТТ. Здесь все последующие операции усиливают положительные свойства ПС и обеспечивают наибольшую долговечность.

Дальнейшее изучение закономерностей ТН проводилось при опробовании технологии многократного ДЦУ (МДЦУ). Максимальное истощение прочностных свойств материала может быть обеспечено равномерным деформированием материала на каждом этапе МДЦУ, что соответствует постоянной скорости накопления плотности скрытой энергии:

$$\dot{U}_{e1} = \dot{U}_{e2} = \dots = \dot{U}_{en} = const \quad (1)$$

В процессе циклического нагружения скорость накопления плотности скрытой энергии переменна, но отклонения от прямолинейной зависимости не всегда значительны [2]. Поскольку ЦТ при однократном ДЦУ процесс кратковременный, то его с некоторым приближением можно характеризовать постоянной скоростью, равной скорости накопления скрытой энергии в начальный момент нагружения. Тогда равенство (1) примет вид:

$$\dot{U}_{e01} = \dot{U}_{e02} = \dots = \dot{U}_{e0n} = const \quad (2)$$

Скорость накопления плотности скрытой энергии в начальный момент нагружения описывается зависимостью [2]:

$$\dot{U}_{e0} = A_0 (\alpha_y \sigma_i^2 - U_{e0}) \quad (3)$$

где A_0 – кинетический коэффициент, определяемый по формулам:

$$A_0 = v_0 U'(\sigma_0, T) / h \times \exp[-U'(\sigma_0, T) / kT] \quad (4)$$

$$U'(\sigma_0, T) = U_0' + \Delta U'(T) \pm \beta_u \sigma_0^2 \quad (5)$$

$$\alpha_u = U_{e^*} V_0 M_{r^2} / \sigma_{0,2} S_{0^*}; \beta_u = \alpha_u G / 3K \quad (6)$$

где $U'(\sigma_0, T)$ – энергия активации процесса разрушения; U_0' – энергия активации процесса разрушения при температуре $T=0$ и $\sigma_0=0$; $\Delta U'(T)$ – изменение энергии активации с повышением температуры; α_u, β_u – структурные коэффициенты; σ_i, σ_0 – девиаторная и шаровая часть тензора напряжений; v_0 – коэффициент неравномерности распределения скрытой энергии по объему; k, h – постоянные Планка и Больцмана соответственно; V_0 – атомный объем; M_k – коэффициент эквивалентности статических и динамических напряжений; $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести материала; S_{0^*} – истинное сопротивление разрушению материала; U_{e^*} – критическая плотность скрытой энергии; G, K – модули сдвига и объемной упругости.

Кратковременную ЦТ в многоцикловой области можно считать изотермическим процессом, что соответствует $T \cong T_0 \cong const$ и $\Delta U'(T)=0$. При определении выражения (4), не стоящего под знаком \exp величиной $\beta_u \sigma_0^2 \ll U_0'$ можно пренебречь.

Величины $\frac{v_{0n-1} \times \exp(\beta_{zn-1} \sigma_{0n-1}^2 / kT)}{v_{0n} \times \exp(\beta_{zn} \sigma_{0n}^2 / kT)} \cong 1$ и $U_{e0} \ll \alpha_{un} \sigma_i^2$.

Подставив формулы (3), (4) и (5) в равенство (2) с учетом выше изложенного и проведя преобразования получим соотношение между напряжениями ЦТ предыдущего и последующего этапов МДЦУ:

$$\sigma_{in} = (\alpha_{un-1} / \alpha_{un})^{1/2} \sigma_{in-1} \quad (7)$$

Используя выражение (6) и зависимости $\sigma_{0,2}$ и S_{0^*} от микротвердости, приведенные в работе [1]: $S_{0^*} = 0,46HV + 65$ и $S_i = 0,067HV^{1/2}$, уравнение (7) с некоторым приближением может быть преобразовано к виду:

$$\sigma_{in} = (HV_{0n} / HV_{0n-1}) \sigma_{in-1} \quad (8)$$

где HV_{0n} и HV_{0n-1} минимальные величины микротвердости в предполагаемой зоне образования трещины перед n -ым и $(n-1)$ -ым нагружениями.

Таким образом, для усиления эффекта ТН при МДЦУ необходимо увеличивать амплитуду напряжений последующего этапа нагружения пропорционально изменению микротвердости в зоне предполагаемого разрушения. Для подтверждения выше изложенного проведен расчет коэффициентов передачи K_1 и K_2 параметров U_{e0} и k_σ , а также повышения долговечности для однократного ДЦУ, трехкратного ДЦУ при постоянной амплитуде напряжений (МДЦУ-1) и трехкратного ДЦУ при амплитуде напряжений, изменяющейся согласно выражению (8) (МДЦУ-2). Расчет выполнялся по специально разработанной методике [3], результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3. Коэффициенты передачи наследственных свойств ПС при ДЦУ

Вид упрочнения	Структурные параметры		Коэффициенты передачи		Повышение долговечности	
	$U_{e0}, \text{МДж/м}^3$	k_σ	K_1	K_2	расчетное	эксперимент.
АВ (исх)	5840,4	32,30	1	1	1	1,12
ДЦУ	6125,7	31,22	0,95	1,03	2,07	2,21
МДЦУ-1	6304,2	29,45	0,93	1,10	4,01	3,39
МДЦУ-2	6349,8	29,01	0,92	1,11	5,13	5,37

Установлено, что на всех этапах МДЦУ изменение коэффициентов передачи наследственных свойств носит монотонный характер, причем их значения при МДЦУ-2 изменяются более интенсивно, чем при МДЦУ-1, что соответствует более высокой усталостной долговечности.

Выводы: знания закономерностей ТН позволили направленно формировать опти-

мальное с позиции усталостной долговечности качество ПС деталей на этапе его технологического конструирования путем выполнения последовательности операций ТТ, Сф, АВ и ДЦУ. Для дальнейшего повышения долговечности может быть рекомендовано проведения многократного ДЦУ с увеличивающейся величиной амплитуды напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Кулаков, Г.А. Системный анализ качества поверхностного слоя при проектировании технологических процессов по критерию долговечности / Г.А. Кулаков, И.И. Усольцева // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2009. №3 (25). С. 150-157.
2. Федоров, В.В. Кинетика повреждаемости и разрушения твёрдых тел – Ташкент: ФАН, 1985. 168 с.
3. Кулаков, Г.А. Определение технологических параметров деформационно-циклического упрочнения из условия обеспечения заданного уровня повышения долговечности / Г.А. Кулаков, И.И. Усольцева // Высокие технологии в машиностроении: Матер. Всероссийской науч.-техн. интернет-конф. с международным участием / Отв. редактор В.Н. Трусов. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2006. С. 194-199.

**ENGINEERING OF THE SURFACE LAYER AND
TECHNOLOGICAL HEREDITY**

© 2010 I.I. Usoltseva

Samara State Technical University

It is analysed regularity of inheritance the properties of a surface layer at its technological disign.

Key words: *surface layer; quality; technological heredity; a transfer coefficient, fatigue longevity*