

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ

DETERMINATION OF THE RESIDUAL STRESSES IN THE SURFACE LAYER OF RESPONSIBLE MACHINE PARTS WITH THE LIGHT OF TECHNOLOGICAL HEREDITY

Prof. dr. eng. Kiselev E., mag. eng. Blagovskiy O.
Faculty of Mechanical – Ulyanovsk State Technical University, Russia

Abstract: Represented by the refined method of calculating the technological residual stresses in the surface charge of machine parts made of corrosion-resistant steel after machining operation taking into account technological heredity. These results show that this method allows with sufficient accuracy for engineering calculations to determine the residual stresses in machine parts immediately after their production on machine tools.

KEYWORDS: RESIDUAL STRESSES, TECHNOLOGICAL HEREDITY, SURFACE LAYER

1. Введение

Общеизвестно, что заключительные операции технологического процесса (ТП) обработки заготовок, в частности шлифование, помимо обеспечения высокой размерной точности и малых значений параметров шероховатости поверхностного слоя (ПС), как правило, сопряжены с высокими контактными температурами в зоне обработки, что может стать причиной образования в ПС готовых деталей нежелательных растягивающих технологических остаточных напряжений (ТОН). Наиболее остро данная проблема стоит при изготовлении высокоточных деталей из труднообрабатываемых материалов, отличающихся особыми физико-механическими свойствами (например, низкой теплопроводностью или невысокой температурой плавления). Известные методы снятия (релаксации) ТОН связаны либо с высокими энергетическими и временными затратами (естественное или искусственное старение, отжиг), либо с невозможностью достижения заданной точности формы (алмазное или твердосплавное выглаживание и т.д.). Для обеспечения требуемых физико-механических свойств ПС при сохранении заданной точности и других параметров качества деталей машин, на наш взгляд, имеется возможность рационально использовать явление технологической наследственности, создавая необходимый уровень ТОН на операции, предшествующей окончательной.

Как известно, технологической наследственностью (ТН) называется перенесение на готовое изделие в процессе его обработки геометрических погрешностей, механических и физико-химических свойств исходной заготовки или свойств и погрешностей, сформировавшихся у заготовки на отдельных операциях изготовления изделия. При этом, ТН зависит не только от вида и режимов обработки, используемых на окончательной операции. Как правило, она проявляется в изменении свойств или потере точности формы готовой детали при ее эксплуатации в результате воздействия на те или иные элементы состояния поверхностного слоя, созданные в поверхностном слое детали при ее черновой обработке.

Проявление ТН может привести как к улучшению, так и к ухудшению эксплуатационных свойств деталей машин. Для рационального использования данного явления с целью повышения эксплуатационных свойств готовой детали необходимо установить непосредственные связи между параметрами качества, сформированными на полустовых и окончательных операциях ТП.

2. Предпосылки и средства для решения проблемы

В соответствии с методикой Дальского [1], технологическая наследственность параметров качества оценивается с помощью коэффициента наследования K :

$$(1) b_{i+1} = K \cdot b_i,$$

где b_{i+1} – значение параметра качества после $(i+1)$ -ой операции ТП; b_i – значение параметра качества после i -ой операции ТП.

Данная формула, весьма актуальная для учета наследования параметров макро- и микронеровностей, а также волнистости, нуждается в существенной доработке при применении ее для расчета величин ТОН.

3. Решение рассматриваемой проблемы

На фиг. 1 показана схема для определения величины остаточных напряжений в поверхностном слое детали с учетом технологической наследственности.

Как известно, на формирование остаточных напряжений наибольшее влияние оказывает теплосиловая напряженность процесса и свойства самого обрабатываемого материала. Это указывает на отсутствие непосредственной зависимости абсолютной величины ТОН от напряжений, полученных на предыдущей операции ТП. Следовательно, формула (1) примет вид:

$$(2) \sigma_{i+1}(h_A) = K_Z \cdot \sigma_i(Z_{i+1} + h_A) + \sigma_{i+1}^{TC}(h_A),$$

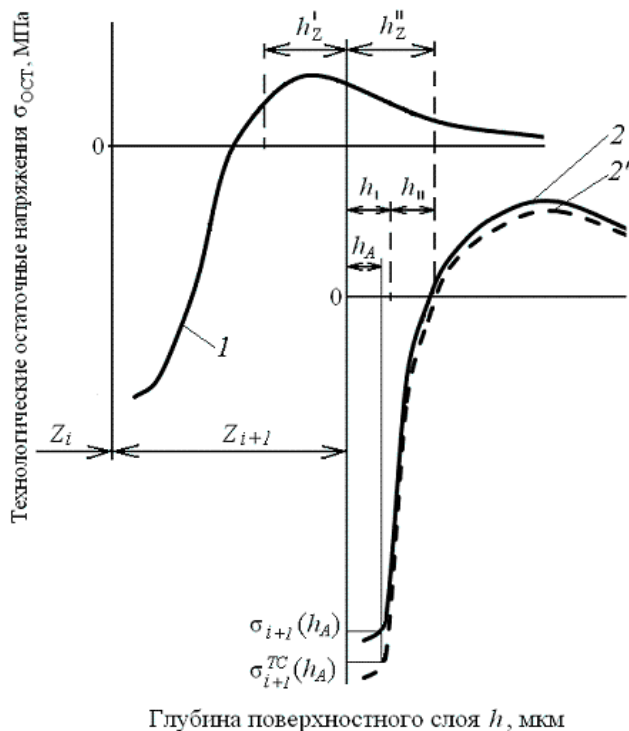
где K_Z – коэффициент наследования остаточных напряжений; $\sigma_i(Z_{i+1} + h_A)$ – величина остаточных напряжений после i -ой операции ТП на глубине $(Z_{i+1} + h_A)$, МПа.

Следует отметить, что в представленной выше формуле учитывает значение величины ТОН на глубине $(Z_{i+1} + h_A)$. Однако, например, при шлифовании часть зерен, участвующих в процессе обработки, не режут, а пластически деформируют материал заготовки, следовательно, нельзя утверждать, что весь припуск будет полностью удален. Существенный объем данного материала деформируется и станет частью вновь образованного ПС. Таким образом, остаточные напряжения, возникшие в ПС заготовки на i -ой операции ТП на некоторой глубине, меньшей величины припуска Z_{i+1} , также будут оказывать влияние на величину ТОН в готовой детали. Это явление носит название суперпозиции или наложения зон наклепов. Кроме того, ПС шлифованной детали будет деформироваться и упрочняться, что также необходимо учитывать.

Определить глубину деформируемого на этапе шлифования ПС можно из условия обработки единичным абразивным зерном. Известно, что процесс поверхностно-пластического деформирования (ППД) абразивными зернами (АЗ) шлифовального круга происходит при выполнении следующего неравенства [2]:

$$(3) 0,01 \leq a/r_{AZ} \leq 0,5$$

где a – глубина внедрения единичного зерна, мм; r_{A3} – радиус зерна, мм.



Фиг. 1. Схема для определения величины остаточных напряжений в поверхностном слое детали с учетом технологической наследственности

Z_i – припуск, снимаемый на i -ой операции технологического процесса изготовления детали, мм; Z_{i+1} – припуск, снимаемый на $(i+1)$ -ой операции, мм; h_Z^I – глубина пластически деформируемого материала припуска Z_{i+1} в ходе $(i+1)$ -ой операции, мкм; h_Z^{II} – глубина вновь образуемого поверхностного слоя, упрочненного в процессе $(i+1)$ -ой операции, мкм; h_I – глубина поверхностного слоя заготовки после $(i+1)$ -ой операции, в которой происходит наследование остаточных напряжений из зоны h_Z^I , мкм; h_{II} – глубина поверхностного слоя заготовки после $(i+1)$ -ой операции, в которой происходит наследование остаточных напряжений из зоны h_Z^{II} , мкм; h_A – глубина поверхностного слоя, на которой необходимо определить значение остаточных напряжений, сформировавшихся в ходе $(i+1)$ -ой операции, мкм; $\sigma_{i+1}(h_A)$ – реальная величина остаточных напряжений после $(i+1)$ -ой операции на исследуемой глубине h_A , МПа; $\sigma_{i+1}^{TC}(h_A)$ – ожидаемая величина остаточных напряжений на исследуемой глубине h_A , обусловленная теплосиловой напряженностью $(i+1)$ -ой операции, МПа; 1 – эпюра остаточных напряжений, сформировавшихся в поверхностном слое заготовки в ходе i -ой операции; 2 – эпюра остаточных напряжений, сформировавшихся в поверхностном слое заготовки в ходе $(i+1)$ -ой операции; 2' – эпюра ожидаемых остаточных напряжений, обусловленных теплосиловой напряженностью $(i+1)$ -ой операции

Однако в связи с большим разбросом предельных значений неравенства (3), оно не может быть использовано для определения величины h_Z^I . Поэтому, глубину пластически деформируемого материала припуска целесообразно рассчитывать из известной формулы определения площади контакта сферического индентора с цилиндрической заготовкой:

$$(4) F = \frac{2 \cdot \pi \cdot h_Z^I \cdot r_{A3} \cdot (2 \cdot R_{3AG} + r_{A3})}{R_{3AG} + r_{A3}},$$

где F – площадь контакта индентора с заготовкой, мм²; R_{3AG} – радиус обрабатываемой заготовки, мм.

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

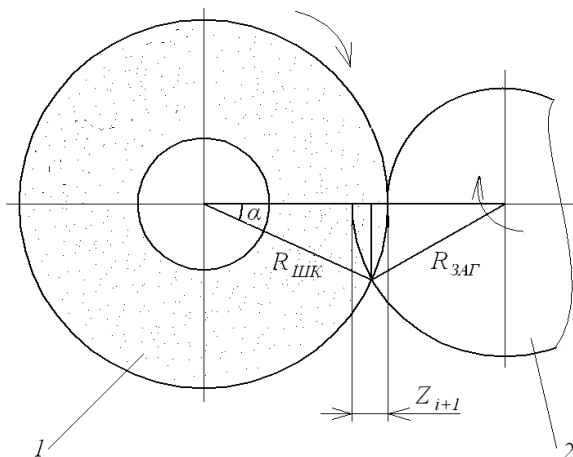
$$(5) F = P_{A3} / \sigma_T,$$

где P_{A3} – усилие деформирования единичным абразивным зерном, Н; σ_T – предел текучести материала поверхностного слоя, МПа.

Подставив (5) в (4) и выразив оттуда h_Z^I , получим:

$$(6) h_Z^I = \frac{P_{A3} \cdot (R_{3AG} + r_{A3})}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_T \cdot r_{A3} \cdot (2 \cdot R_{3AG} + r_{A3})}.$$

На фиг. 2 изображена схема контакта шлифовального круга (ШК) с обрабатываемой заготовкой.



Фиг. 2. Схема круглого наружного шлифования

1 – шлифовальный круг; 2 – обрабатываемая заготовка; α – угол контакта круга с заготовкой, град.

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

$$(7) S_{ШК} = 2 \cdot \pi \cdot R_{ШК} \cdot H_{ШК},$$

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

Площадь поверхности контакта ШК с заготовкой находится по формуле:

$$(8) S_{ПК} = (\alpha / 360^\circ) \cdot S_{ШК}.$$

Из теоремы косинусов следует (см. фиг. 2):

$$(9) R_{3AG}^2 = R_{ШК}^2 + (R_{3AG} + R_{ШК} - Z_{i+1})^2 - 2 \cdot R_{ШК} \cdot (R_{3AG} + R_{ШК} - Z_{i+1}) \cdot \cos \alpha.$$

Следовательно, угол контакта круга с заготовкой равен:

$$(10) \alpha = \arccos \left[\frac{R_{ШК}^2 + (R_{3AG} + R_{ШК} - Z_{i+1})^2 - R_{3AG}^2}{2 \cdot R_{ШК} \cdot (R_{3AG} + R_{ШК} - Z_{i+1})} \right].$$

Общее число абразивных зерен на поверхности ШК можно рассчитать по формуле:

$$(11) n_3 = c \cdot S_{ПК} / (\pi \cdot r_{A3}^2),$$

где c – доля абразивных зерен в объеме шлифовального круга, определяемая по номеру структуры круга.

Известно [3], что число режущих зерен n_p в зависимости от давления круга на заготовку находится в пределах от 4 до 17%. Следовательно, примерно 83 – 96% зерен составляют нережущие и давящие зерна. Л. А. Глейзер установил [4], что сумма режущих и пластически деформирующих АЗ составляет около 24% от общего числа зерен. Приняв n_p примерно равным 10%, получаем, что 14% зерен являются давящими, то есть:

$$(12) n_d = 0,14 \cdot n_z,$$

где n_d – число пластически деформирующих абразивных зерен. Таким образом, усилие деформирования единичным АЗ поверхностного слоя заготовки можно определить по формуле:

$$(13) P_{AZ} = P_y / n_d,$$

где P_y – осевая составляющая силы шлифования, Н. Величина упрочненного в процессе шлифования слоя равняется h''_z (см. фиг. 1) и может быть приближенно определена по формуле [5]:

$$(14) h''_z = \sqrt{P_{AZ} / 2 \cdot \sigma_T}.$$

Учет наследования напряжений в этом слое, возникших в ходе i -ой операции, следует проводить следующим образом. Допустим, нам необходимо определить величину ТОН на некоторой глубине h_A шлифованной детали (см. фиг. 1). Первоначально необходимо выявить, в какой из областей (h_I или h_{II}) находятся искомые напряжения. Предположим, что значения h_I и h_{II} подобны h'_z и h''_z , т.е. $h_I / h_{II} = h'_z / h''_z$. Сумма величин h_I и h_{II} равняется h''_z . Следовательно, можно составить систему уравнений и вывести из нее значения искомых величин:

$$(15) \begin{cases} h_I / h_{II} = h'_z / h''_z \\ h_I + h_{II} = h''_z \end{cases}$$

Пользуясь принципом подобия, определяем глубину залегания остаточных напряжений для каждого рассматриваемого случая. Таким образом, формула (2) примет вид:

при $h_A < h_I$:

$$(16) \sigma_{i+1}(h_A) = K_d \cdot K_z \cdot \sigma_i (Z_{i+1} - h'_z \cdot [1 - h_A/h_I]) + \sigma_{i+1}^{TC}(h_A);$$

при $h_I < h_A < h''_z$:

$$(17) \sigma_{i+1}(h_A) = K_z \cdot \sigma_i (Z_{i+1} + h_I + h_A \cdot h_{II} / h''_z) + \sigma_{i+1}^{TC}(h_A).$$

где K_d – коэффициент, учитывающий соотношение числа пластически деформирующих абразивных зерен к общему количеству зерен, участвующих в удалении припуска.

Как отмечалось выше, число пластически деформирующих зерен в 1,4 раза больше, чем режущих, а, следовательно, они составляют 58% от числа АЗ, участвующих в удалении припуска, то есть $K_d = 0,58$.

На глубине $h_A > h''_z$ материал ПС не подвергается пластической деформации, а, следовательно, для расчетов остаточных напряжений необходимо использовать формулу (2).

Так как для каждого обрабатываемого материала при одинаковых параметрах режима окончательной обработки (например, шлифования) величины $\sigma_{i+1}^{TC}(h_A)$, Z_{i+1} , h'_z , h''_z , h_I , h_{II} , h_A и K_z являются постоянными, то существенным резервом для обеспечения требуемого уровня ТОН в готовой детали является возможность управления величиной остаточных напряжений $\sigma_i(z)$, полученных на предыдущей операции.

Для этого можно использовать методы поверхностно-пластического деформирования, в частности, ультразвуковое твердосплавное выглаживание (УЗТВ).

4. Результаты и дискуссия

На кафедре «Технология машиностроения» Ульяновского государственного технического университета были рассмотрены несколько вариантов технологического процесса изготовления детали типа тела вращения из коррозионно-стойкой стали 95X18. Оба этих ТП включают операцию комбинированного точения и УЗТВ с различными параметрами режима обработки (резец оснащен твердосплавной пластиной Korloy CCMT 060204-HMP NC-9020; выглаживатель – пластиной Korloy CNMG 120408-HS NC-9025), выполняемой на токарно-винторезном станке повышенной точности УТ16П, и шлифования (круглошлифовальный станок 3М151В, круг 24А25НС17К26 1-600х25х305).

Образцами при исследованиях служили валики диаметром 45 мм и длиной 250 мм из коррозионно-стойкой подшипниковой стали 95X18. Ультразвуковые (УЗ) колебания (частотой $f = 19,6$ кГц, амплитудой $A = 5 - 7$ мкм) накладывали на твердосплавный выглаживатель или релаксатор от УЗ-генератора Техма-2М [6].

Обработку шлифованием осуществляли с подачей к зоне контакта инструмента с заготовкой 3%-ного водного раствора смазочно-охлаждающей жидкости Велс-1 свободно-падающей струей (поливом, с расходом 40 л/мин). Комбинированную обработку выполняли с подачей в зону контакта твердосплавного выглаживателя с заготовкой 100%-ного концентрата СОЖ Велс-1 с расходом 5 г/час путем нанесения её на контактирующие объекты кистью. Параметры режима обработки на каждой операции для обоих рассматриваемых ТП изготовления детали приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры режима обработки на операциях рассматриваемых технологических процессов изготовления деталей

Вариант ТП	Параметры режима обработки заготовки						
	Точение и УЗТВ				Шлифование		
	Припуск Z_i , мм	Подача S , мм/об	Окружная скорость заготовки V_3 , м/мин	Усилие прижима индентора P , Н	Припуск Z_{i+1} , мм	Скорость подачи стола V_C , мм/мин	Скорость вращения заготовки V_3 , м/мин
1	0,2	0,096	10	50	0,05	30	40
2	0,4	0,096	15,7	150	0,05	30	40

Определяли величину ТОН с учетом технологического наследования после шлифования на глубине $h_A = 10, 15$ и 20 мкм. Результаты экспериментального измерения величины остаточных напряжений и аналитического расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета остаточных напряжений

Направление ТОН	ТОН на глубине h_A , измеренные экспериментально, МПа			ТОН на глубине h_A , рассчитанные по формулам (16) – (17), МПа		
	10 мкм	15 мкм	20 мкм	10 мкм	15 мкм	20 мкм
Касательные	-150	-99	-30	-165	-108	-33
Осевые	223	268	288	240	283	302

5. Заключение

Погрешность при расчете составила не более 8-10% по сравнению с данными, полученными в ходе натурального эксперимента.

Таким образом, представленная выше методика учета явления технологического наследования позволяет с достаточной для инженерных расчетов точностью определять получаемые в ПС шлифованных заготовок остаточные напряжения. Для этого следует изготовить опытный образец детали по имеющемуся техпроцессу и произвести измерения образовавшихся в ней ТОН, после чего, пользуясь описанной в данной статье методикой, необходимо определить требуемые значения напряжений на предварительном этапе обработки и внести соответствующие изменения в параметры режима этой обработки.

6. Литература

1. Дальский, А. М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. – М.: Машиностроение, 1975. – 222 с.

2. Худобин, Л. В. Пути совершенствования технологии шлифования. – Саратов: Приволжское книжное издательство, 1969. – 212 с.

3. Ящерицын, П. И. Повышение качества шлифования и режущих свойств абразивно-алмазного инструмента / П. И. Ящерицын, А. Г. Зайцев. – Минск: Наука и техника, 1972. – 480 с.

4. Глейзер, Л. А. О сущности процесса круглого шлифования // Вопросы точности в технологии машиностроения. – М.: Станкин, 1959. – С. 5 – 24.

5. Хейфец С. Г. Аналитическое определение глубины наклепанного слоя. – В сб. ЦНИИТ-маша. – М.: Машгиз, 1952 – Кн. 49 – С. 7–17.

6. Киселев, Е. С. Механическая обработка заготовок в условиях критического тепломассопереноса. Избранные труды Российской школы по проблемам науки и технологий / Е. С. Киселев, В. Н. Ковальногов. – М.: РАН, 2008. – 250 с.