

Определение остаточных напряжений в поверхностном слое деталей с учетом технологической наследственности¹

Приведена методика расчета технологических остаточных напряжений в поверхностном слое шлифованных деталей из коррозионно-стойкой стали.

Ключевые слова: остаточные напряжения, поверхностный слой, наследственность.

A method for calculating of technological residual stresses in the surface layer of ground details out of corrosion-resistant steel is presented.

Keywords: residual stresses, surface layer, heredity.

Известно, что финишные операции технологического процесса (ТП) обработки заготовок, в частности шлифование, не только обеспечивают высокую размерную точность и небольшую шероховатость поверхностного слоя (ПС), но и сопряжены с высокими контактными температурами в зоне обработки, что может стать причиной образования в ПС готовых деталей нежелательных растягивающих технологических остаточных напряжений (ТОН). Особенно остро данная проблема стоит при изготовлении высокоточных деталей из труднообрабатываемых материалов, имеющих низкую теплопроводность или невысокую температуру плавления. Известные методы снятия (релаксации) ТОН связаны либо с высокими энергетическими и временными затратами (естественное или искусственное старение, отжиг), либо с невозможностью достижения заданной размерной точности (алмазное или твердосплавное выглаживание и т. д.). Поэтому для обеспечения требуемых физико-ме-

ханических свойств ПС при сохранении заданной точности и других параметров качества деталей рационально использовать технологическую наследственность (ТН), создавая необходимый уровень ТОН на операции, предшествующей окончательной.

Технологической наследственностью называется перенесение на готовое изделие в процессе его обработки погрешностей, механических и физико-химических свойств исходной заготовки или свойств и погрешностей, сформировавшихся у заготовки на отдельных операциях изготовления изделия. ТН зависит не только от вида и режимов обработки, примененных на чистовой операции. Она проявляется в изменении свойств или в потере точности формы готовой детали при эксплуатации в результате наследования состояния ПС детали после черновой обработки.

Проявление ТН может привести как к улучшению, так и ухудшению эксплуатационных свойств деталей. Для целесообразного использования данного явления необходимо установить взаимосвязи между параметрами качества, сформированными на получистовых и чистовых операциях ТП.

Технологическое наследование параметров качества оценивается коэффициентом K [1]:

$$b_{i+1} = Kb_i, \quad (1)$$

где b_i , b_{i+1} — параметры качества после соответственно i -й и $(i+1)$ -й операций ТП.

Однако формула (1), актуальная для учета наследования параметров макро- и микронеровностей, а также волнистости, нуждается в существен-

¹ Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ 08-00-00200-а.

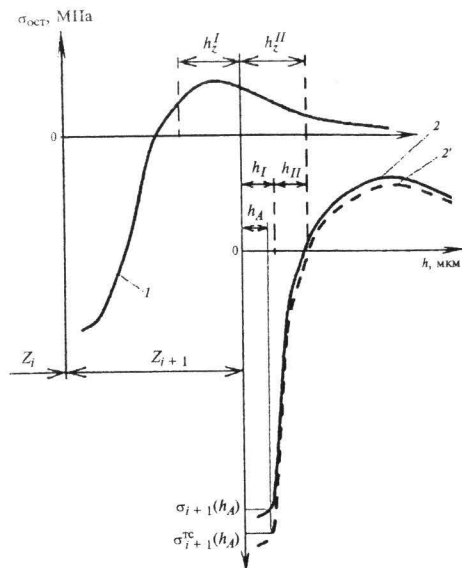


Рис. 1. Эпюры для определения остаточных напряжений в ПС детали с учетом ТН: Z_i , Z_{i+1} — припуски, снимаемые соответственно на i -й и $(i+1)$ -й операциях ТП изготовления детали; 1 и 2 — эпюры остаточных напряжений, сформировавшихся в ПС заготовки в ходе i -й и $(i+1)$ -й операций; 2' — эпюра ожидаемых остаточных напряжений, обусловленных теплосиловой напряженностью $(i+1)$ -й операции

ной доработке при применении ее для расчета величин ТОН.

Определения остаточных напряжений σ_{i+1} в ПС детали с учетом ТН показано на рис. 1. Здесь h_Z^I и h_Z^{II} — глубины соответственно пластически деформируемого материала припуска и упрочненного ПС в процессе $(i+1)$ -й операции; h_I и h_{II} — глубины ПС заготовки после $(i+1)$ -й операции, в которой происходит наследование остаточных напряжений соответственно из зон h_Z^I и h_Z^{II} .

Реальная величина $\sigma_{i+1}(h_A)$ остаточных напряжений на заданной глубине h_A после $(i+1)$ -й операции вследствие влияния ТН будет несколько отличаться от ожидаемой величины $\sigma_{i+1}^{tc}(h_A)$, обусловленной теплосиловой напряженностью $(i+1)$ -й операции.

Как известно, на формирование остаточных напряжений наибольшее влияние оказывают теплосиловая напряженность процесса и свойства обрабатываемого материала. Это указывает на отсутствие непосредственной зависимости ТОН от

напряжений, полученных на предыдущей операции ТП. Следовательно, формула (1) примет вид:

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

где K_Z — коэффициент наследования ТОН; $\sigma_i(Z_{i+1} + h_A)$ — ТОН после i -й операции ТП на глубине $(Z_{i+1} + h_A)$, МПа.

В формуле (2) учитывается величина ТОН на глубине $(Z_{i+1} + h_A)$. Однако, например при шлифовании, часть зерен, участвующих в процессе обработки, не режет, а пластически деформирует материал заготовки, следовательно, нельзя утверждать, что припуск будет удален полностью. Существенный объем материала деформируется и становится частью вновь образованного ПС. Таким образом, остаточные напряжения, возникшие в ПС заготовки на i -й операции ТП на глубине, меньшей припуска Z_{i+1} , также будут оказывать влияние на величину ТОН в готовой детали. Это явление называется суперпозицией или наложением зон наклепов. Кроме того, ПС шлифованной детали будет деформироваться и упрочняться, что также необходимо учитывать.

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

$$0,01 \leq a/\rho \leq 0,5, \quad (3)$$

где a — глубина внедрения единичного зерна, мм; ρ — радиус зерна, мм.

Следовательно, зная радиус зерна (из характеристики круга) можно определить величину a , которая и будет глубиной h_Z^I пластически деформируемого в ходе шлифования ПС (см. рис. 1). Глубину h_Z^{II} упрочненного в процессе шлифования слоя можно приблизительно определить по формуле [3]

$$h_Z^{II} = \sqrt{P_y/\sigma_{0,2}}, \quad (4)$$

где P_y — радиальная составляющая силы шлифования, Н; $\sigma_{0,2}$ — предел текучести материала ПС, МПа.

Наследование напряжений в этом слое, возникших в ходе i -й операции, будем учитывать следующим образом. Допустим, необходимо определить величину ТОН на глубине h_A (см. рис. 1). Сначала определим, на какой глубине (h_I или h_{II}) находятся искомые напряжения. Предположим, что значения h_I и h_{II} подобны, следовательно, можно составить систему уравнений:

$$\begin{cases} h_I/h_{II} = h_Z^I/h_Z^{II}, \\ h_I + h_{II} = h_Z^{II}. \end{cases} \quad (5)$$

Используя принцип подобия, определим глубину залегания остаточных напряжений для каждого рассматриваемого случая. Тогда формула (2) примет вид:

$$\sigma_{i+1}(h_A) = K_d K_Z \sigma_i(Z_{i+1} - h_Z^I[1 - h_A/h_I]) + \sigma_{i+1}^{tc}(h_A) \text{ при } h_A < h_I; \quad (6)$$

$$\sigma_{i+1}(h_A) = K_Z \sigma_i(Z_{i+1} + [h_A - h_I]h_Z^{II}/h_I) + \sigma_{i+1}^{tc}(h_A) \text{ при } h_I < h_A < h_Z^{II}, \quad (7)$$

где K_d — коэффициент, учитывающий соотношение числа пластически деформирующих абразивных зерен (A_3) к общему числу зерен, участвующих в удалении припуска.

Известно [4], что в зависимости от давления круга на заготовку число n_p режущих зерен составляет от 4 до 17 %. Следовательно, примерно 83÷96 % зерен составляют нережущие и давящие зерна. Л. А. Глейзер установил [5], что на режущие и пластически деформирующие A_3 приходится около 24 % от общего числа зерен. Приняв $n_p = 10$ %, получим, что 14 % A_3 являются давящими. Таким образом, пластически деформирующих зерен в 1,4 раза больше, чем режущих, и, следовательно, они составляют 58 % A_3 , участвующих в удалении припуска, т. е. $K_d = 0,58$.

На глубине $h_A > h_Z^{II}$ материал ПС не подвергается пластической деформации и, следовательно, для расчетов ТОН 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^I , h_Z^{II} , h_I , h_{II} , h_A и K_Z являются постоянными, то резервом для обеспечения требуемого уровня ТОН в готовой детали будет возможность управления остаточными напряжениями $\sigma_i(z)$, полученными на предыдущей операции. Для этого можно использовать методы ППД, в частности, ультразвуковое твердосплавное выравнивание (УЗТВ).

Рассмотрим два варианта ТП изготовления детали типа тела вращения из коррозионно-стойкой стали 95Х18. Оба ТП включают операцию комбини-

рованного точения и УЗТВ с различными режимами (резец оснащен твердосплавной пластиной Korloy CSMT 060204-HMP NC-9020; выравниватель — пластиной Korloy CSMT 120408-HS NC-9025). Точение выполняется на токарно-винторезном станке повышенной точности УТ16П, шлифование на круглошлифовальном станке 3М151В (круг 24А25НС17К26 1-600×25×305).

Исследовали образцы валиков диаметром 45 мм и длиной 250 мм из коррозионно-стойкой подшипниковой стали 95Х18. Ультразвуковые (УЗ) колебания (частота $f = 19,6$ кГц, амплитуда $A = 5 \div 7$ мкм) накладывали на твердосплавный выравниватель или релаксатор от УЗ-генератора Техма-2М [6].

Шлифование осуществляли при подаче в зону контакта инструмента с заготовкой 3 %-го водного раствора СОЖ "Велс-1" свободно-падающей струей (полив, расход 40 л/мин). Комбинированную обработку выполняли с нанесением кистью на контактирующие поверхности твердосплавного выравнивателя и заготовки 100 %-го концентрата СОЖ "Велс-1" (расход 5 г/ч). Режимы обработки на каждой операции для обоих вариантов ТП изготовления детали приведены в таблице.

Предположим, что необходимо определить величину ТОН с учетом ТН после шлифования на глубине $h_A = 10$ и 15 мкм. Из условия (3) принимаем $a/\rho = 0,25$. Из характеристики круга радиус зерна $\rho = 125$ мкм. Следовательно, $h_Z^I = a = 0,25\rho = 31,25$ мкм.

Предел текучести стали 95Х18 $\sigma_{0,2} = 420$ МПа, а радиальная сила при шлифовании на указанных режимах, измеренная с помощью тензометрических центров круглошлифовального станка, $P_y = 247,32$ Н. Подставив данные значения в равенство (4), получим: $h_Z^{II} = \sqrt{P_y/\sigma_{0,2}} = 767$ мкм.

На рис. 2 приведены эпюры остаточных напряжений после комбинированной обработки — точение + УЗТВ и дальнейшее шлифование и шлифования с УЗТВ. Подставив полученные данные в равенство (5) и решив систему уравнений, получим $h_I = 30$ и $h_{II} = 737$.

Следовательно, искомые ТОН лежат на глубине h_Z^I . Далее, согласно уравнению (6), определим глубину ПС заготовки после операции точения, с которой будут наследоваться ТОН. Для дальней-

Вариант ТП	Режим обработки заготовки при						
	точения и УЗТВ				шлифовании		
	Припуск Z_i , мм	Подача S , мм/об	Окружная скорость заготовки v , м/мин	Усилие прижима индентора P , Н	Припуск Z_{i+1} , мм	Скорость стола v_c , мм/мин	Окружная скорость заготовки v , 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

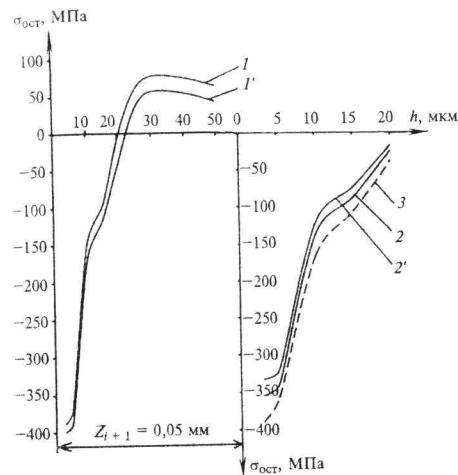


Рис. 2. Эпюры касательных остаточных напряжений, сформировавшихся при изготовлении детали из стали 95X18: 1 и 1' — точение + УЗТВ на режимах, соответствующих 1-му и 2-му вариантам ТП (см. таблицу); 2 и 2' — шлифование ($v_3 = 40$ м/мин, $v_c = 30$ мм/мин, $Z_{i+1} = 0,05$ мм); 3 — шлифование + УЗТВ ($v_3 = 40$ м/мин, $v_c = 30$ мм/мин, $Z_{i+1} = 0,05$ мм, $P = 150$ Н)

ших расчетов нам также понадобятся подобные данные и для $h_A = 5$ мкм:

$$\text{для } h_A = 5 \text{ мкм получим } Z - h_Z^I [1 - h_A/h_I] = 50 - 31,25[1 - 5/30] = 23,96 \approx 24 \text{ мкм;}$$

$$\text{для } h_A = 10 \text{ мкм получим } Z - h_Z^I [1 - h_A/h_I] = 29,17 \approx 29 \text{ мкм;}$$

$$\text{для } h_A = 15 \text{ мкм получим } Z - h_Z^I [1 - h_A/h_I] = 34,38 \approx 34 \text{ мкм.}$$

Вычислим коэффициент K_Z через формулу (6) для расчета ТОН после шлифования на глубине $h_A = 5$ мкм (индексы 1 и 2 у σ означают вариант ТП изготовления детали):

$$[0,58 K_Z \sigma_{i1}(24) + \sigma_{i+1}^{TC}(5)] - [0,58 K_Z \sigma_{i2}(24) + \sigma_{i+1}^{TC}(5)] = \sigma_{(i+1)1}(5) - \sigma_{(i+1)2}(5),$$

откуда $K_Z = 1,31$.

По формуле (6) определим разность между значениями остаточных напряжений в ПС деталей, изготовленных по первому и второму варианту ТП, с учетом ТН на глубине $h_A = 10$ и 15 мкм:

$$\sigma_{(i+1)1}(10) - \sigma_{(i+1)2}(10) = 0,58 \cdot 1,31 \sigma_{i1}(29) - 0,58 \cdot 1,31 \sigma_{i2}(29) = 15,96 \text{ МПа;}$$

$$\sigma_{(i+1)1}(15) - \sigma_{(i+1)2}(15) = 0,58 \cdot 1,31 \sigma_{i1}(34) - 0,58 \cdot 1,31 \sigma_{i2}(34) = 15,96 \text{ МПа.}$$

Эту же разность определяем для экспериментальных данных (см. рис. 2):

$$\sigma_{(i+1)1}(10) - \sigma_{(i+1)2}(10) = 16 \text{ МПа;}$$

$$\sigma_{(i+1)1}(15) - \sigma_{(i+1)2}(15) = 14 \text{ МПа.}$$

Таким образом, предлагаемая методика учета ТН позволяет с достаточной для инженерных расчетов точностью определять остаточные напряжения в ПС шлифованных заготовок. Для этого следует изготовить опытный образец детали по имеющемуся ТП и измерить образовавшиеся в ней ТОН. Затем по приведенной методике определить требуемые значения напряжений на предварительном этапе обработки и внести соответствующие изменения в параметры режима.

На рис. 2 показана эпюра остаточных напряжений, сформированных в ПС заготовки после комбинированной обработки шлифованием и УЗТВ. Видно, что введение операции ППД на заключительной стадии ТП обработки заготовок из коррозионно-стойкой стали 95X18 способствует увеличению сжимающих остаточных напряжений на 12, 36 и 45 % соответственно на глубине 5, 10 и 15 мкм по сравнению с обычным круглым наружным шлифованием. В то же время, рациональный учет ТН позволяет увеличить сжимающие ТОН на тех же глубинах на 6, 16 и 20 % соответственно. Однако, несмотря на существенно большую эффективность обеспечения требуемого уровня ТОН, использование комбинированной обработки шлифованием и УЗТВ не позволяет выдерживать размерную точность и значения параметров шероховатости, характерные для круглого наружного шлифования. Следовательно, при изготовлении прецизионных деталей из коррозионно-стойкой стали необходимо рационально учитывать ТН и создавать требуемые напряжения в ПС заготовок уже на получистовых операциях ТП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

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 изд-во, 1969. 212 с.
3. Маталин А. А. Технология машиностроения. СПб.: Изд-во "Лань", 2008. 512 с.
4. Яшеричин П. И., Зайцев А. Г. Повышение качества шлифования и режущих свойств абразивно-алмазного инструмента. Минск: Наука и техника, 1972. 480 с.
5. Глейзер Л. А. О сущности процесса круглого шлифования // Вопросы точности в технологии машиностроения. М.: Станкин, 1959. С. 5–24.
6. Киселев Е. С., Ковальников В. Н. Механическая обработка заготовок в условиях критического тепломассопереноса // Избранные труды Российской школы по проблемам науки и технологий. М.: РАН, 2008. 250 с.