

УДК 658.562 : 621.757

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ НАСЛЕДСТВЕННОСТЬ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ НЕЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ РЕЗАНИЯ В УЗ-ПОЛЕ

© 2025 Е.С. Киселев¹, А.Р. Нигматуллин²

¹ Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия

² Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 09.09.2025

Рассмотрены вопросы, связанные с решением задачи направленного формирования технологических остаточных напряжений и фазового состава поверхностного слоя нежестких деталей из титановых сплавов в процессе механической обработки с учетом технологической наследственности при введении в зону формообразования ультразвуковых колебаний. Изменения фазового состава поверхностного слоя оценивали по соотношению фаз α -Ti и β -Ti на приборе рентгеновского типа Рикор-7, остаточных напряжений – на Ситон АРМ. Предложены новые методы технологического обеспечения заданного уровня остаточных напряжений и фазового состава поверхностного слоя тонкостенных титановых деталей путем рационального использования энергии ультразвукового поля. Установлено, что коэффициент технологического наследования K_n различается по глубине поверхностного слоя обработанной заготовки, что связано с различной степенью температурной релаксации остаточных напряжений, сформировавшихся в ходе предшествующей технологической операции. Эффективность тепловой релаксации и, как следствие, увеличение или снижение коэффициента наследования K_n в наибольшей степени зависит от физико-механических свойств материала обрабатываемой заготовки, наличия ультразвуковых колебаний в зоне формообразования и элементов режима окончательной обработки, определяющих время и температуру воздействия.

Ключевые слова: технологическая наследственность; ультразвук, остаточные напряжения, фазовый состав, теплосиловая напряженность, релаксация, титановые сплавы.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3(2)-246-254

EDN: QXNGNE

*Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда
№ 24-29-00206, <https://rscf.ru/project/24-29-00206/>*

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, технологическим наследованием (ТН) называется перенесение на готовое изделие в процессе изготовления геометрических погрешностей, механических и физико-химических свойств исходной заготовки или свойств и погрешностей, сформировавшихся на предшествующих операциях. Проявление ТН может привести как к улучшению, так и к ухудшению эксплуатационных свойств деталей машин. Особенно важно учитывать проявление ТН при изготовлении нежестких тонкостенных деталей из титановых сплавов. Последнее объясняется их физико-механическими свойствами: низкой теплопроводностью и фрикционностью, вследствие которых поверхностные слои (ПС) обрабатываемых заготовок при механической обработке подвергаются повышенному теплосиловому воздействию. Это может быть причиной изменений фазового состава (ФС) тонких ПС и возникновению технологических остаточных напряжений (ТОН), негативно влияющих на эксплуатационные характеристики изготавливаемых деталей. В качестве основного средства снижения отрицательного воздействия выше упомянутых физико-механических свойств предложено в зону обработки вводить энергию ультразвуковых (УЗ) колебаний[8], а в качестве «барьера» для ТН – УЗ твердосплавное полосовое выглаживание [5].

В наибольшей степени механизм ТН рассмотрен на примере геометрического копирования исходных погрешностей детали [13]. В настоящей работе особое внимание уделено таким важным параметрам качества ПС как глубина залегания, величина и знак технологических остаточных напряжений и ФС нежестких и тонкостенных деталей из титановых сплавов, формируемых на протяжении всего технологического процесса их изготовления.

Киселев Евгений Степанович, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник департамента научных исследований. E-mail: kes.ulstu@mail.ru

Нигматуллин Альмир Рафаэлевич, старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты».

МЕТОДИКА, РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Процесс ТН рассмотрен в ходе последовательно выполняемых технологических операций на примере изготовления деталей типа «тело вращения»:

1. Точение, совмещенное с УЗ твердосплавным полосовым выглаживанием. Преимущество последнего перед сферическим алмазным показано в работе [5].

2. Круглое наружное шлифование с УЗ подачей смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) [4] и УЗ релаксацией остаточных напряжений [5].

Общеизвестно, что на формирование ТОН наибольшее влияние оказывает теплосиловая напряженность механической обработки и физико-механические свойства самого обрабатываемого материала, определяющие структурно-фазовые изменения в ПС заготовки. Однако, на наш взгляд, необходимо также учитывать, что в ходе $(i+1)$ -ой технологической операции изготовления деталей часть материала снимается с припуском, а следовательно, физико-механические свойства, сформированные в удаляемом слое, оказывают несколько уменьшенное влияние на свойства вновь образующегося ПС заготовки или готовой детали. Поэтому, для расчета значений ТОН с учетом технологического наследования можно использовать следующее выражение [1,5]:

$$\sigma_{i+1}(h_a) = K_n \cdot \sigma_i(Z_{i+1} + h_a) + \sigma_{i+1}^{TC}(h_a), \quad (1)$$

где h_a – глубина поверхностного слоя, на которой требуется определить значение ТОН, сформированных в ходе $(i+1)$ -ой операции, мкм; Z_{i+1} – припуск, снимаемый на $(i+1)$ -ой операции, мкм; $\sigma_i(Z_{i+1} + h_a)$ – значение ТОН после i -ой операции ТП на глубине $(Z_{i+1} + h_a)$, МПа; $\sigma_{i+1}^{TC}(h_a)$ – значение ТОН на рассматриваемой глубине h_a , обусловленная теплосиловой напряженностью $(i+1)$ -ой операции, МПа; K_n – коэффициент наследования.

Коэффициент наследования K_n является одним из оценочных критериев, определяющих степень влияния параметров качества ПС, полученных в ходе технологической операции, предшествующей окончательной обработке заготовки, на параметры готовой детали. Графическую схему технологического наследования ТОН в ПС цилиндрических заготовок можно представить в виде, показанном на рис. 1 [5].

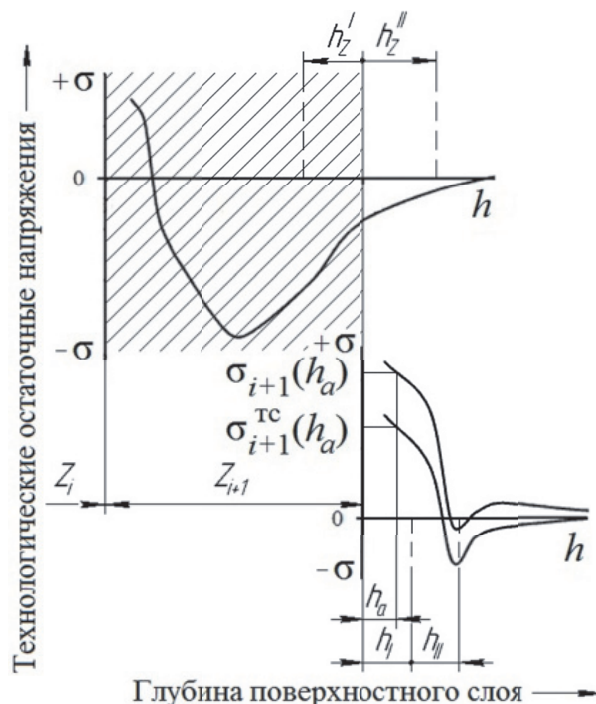


Рис. 1. Схема для определения ТОН в ПС детали после обработки с учетом технологического наследования:

Z_i – припуск, снимаемый на i -ой операции технологического процесса изготовления детали, мм; $\sigma_{i+1}(h_a)$ – реальная величина ТОН после $(i+1)$ -ой операции на исследуемой глубине h_a , МПа; 1 – эпюра ТОН, сформировавшихся в поверхностном слое заготовки в ходе i -ой операции; 2 – эпюра ТОН, сформировавшихся в поверхностном слое заготовки в ходе $(i+1)$ ой операции; 3 – эпюра ТОН, обусловленных теплосиловой напряженностью $(i+1)$ -ой операции; h_z^I – глубина пластически деформируемого материала припуска Z_{i+1} в ходе $(i+1)$ -ой операции, мкм; h_z^{II} – глубина вновь образующегося ПС, упрочненного на $(i+1)$ -ой операции, мкм; h_f – глубина ПС заготовки после $(i+1)$ -ой операции, на которой происходит наследование ТОН из зоны h_z^I , мкм; h_{II} – глубина ПС заготовки после $(i+1)$ -ой операции, на которой происходит наследование ТОН из зоны h_z^{II} , мкм

Следует отметить, что в зависимости (1) учитывается значение ТОН на глубине ($Z_{i+1} + h_a$), тогда как при некоторых видах обработки (например, при шлифовании) часть абразивных зерен, участвующих в процессе обработки, не режут, а пластически деформируют материал заготовки. Следовательно, не весь слой, теоретически подлежащий снятию с заготовки с припуском, будет полностью удален. Некоторый объем материала припуска пластически деформируется и будет частью вновь образованного ПС, который, в свою очередь, будет деформироваться и упрочняться. Таким образом, ТОН, возникшие в ПС заготовки на i -ой операции на глубине, меньшей величины припуска Z_{i+1} , тоже будут оказывать влияние на величину ТОН в готовой детали. Этот процесс носит название суперпозиции или наложения зон наклепов. Определить глубину деформируемого при шлифовании ПС можно на примере резания-царапания единичным абразивным зерном (а.з.). Глубину слоя пластически деформируемого материала припуска в процессе абразивной обработки заготовок типа тел вращения целесообразно, на наш взгляд, определить из известной зависимости для расчета площади контакта сферического индентора (абразивного зерна) с цилиндрической заготовкой [2]:

$$F = \frac{2 \pi h_Z^I r_{a.z.} (2 R_{заг} + r_{a.z.})}{R_{заг} + r_{a.z.}}, \quad (2)$$

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

Площадь контакта F можно найти из условия протекания пластической деформации [10]

$$F = P_{a.z.} / \sigma_T, \quad (3)$$

где $P_{a.z.}$ – усилие деформирования единичным абразивным зерном (а.з.), Н; σ_T – предел текучести материала поверхностного слоя, МПа.

Из анализа (3) и (2), получим:

$$h_Z^I = \frac{P_{a.z.} (R_{заг} + r_{a.z.})}{2 \pi \sigma_T r_{a.z.} (2 R_{заг} + r_{a.z.})}. \quad (4)$$

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

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

$$S_{шк} = 2 \pi R_{шк} H_{шк}, \quad (5)$$

где $R_{шк}$, $H_{шк}$ – радиус и высота шлифовального круга, мм.

Площадь $S_{шк}$ поверхности контакта ШК с заготовкой находим по формуле:

$$S_{шк} = (\alpha / 360^\circ) S_{шк}. \quad (6)$$

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

$$R_{заг}^2 = R_{шк}^2 + (R_{заг} + R_{шк} - Z_{i+1})^2 - 2 R_{шк} (R_{заг} + R_{шк} - Z_{i+1}) \cos \alpha. \quad (7)$$

Угол α контакта круга с заготовкой может быть определен следующим образом:

$$\alpha = \arccos \left[\frac{R_{шк}^2 + (R_{заг} + R_{шк} - Z_{i+1})^2 - R_{заг}^2}{2 R_{шк} (R_{заг} + R_{шк} - Z_{i+1})} \right]. \quad (8)$$

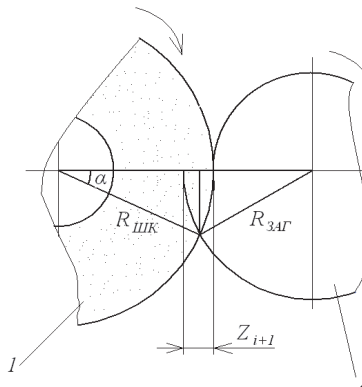


Рис. 2. Схема круглого наружного шлифования:

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

Общее число а.з на поверхности ШК можно рассчитать по зависимости:

$$n_z = c S_{шк} / (\pi r_{a.z.}^2), \quad (9)$$

где c – доля абразивных зерен в объеме ШК (остальное – связка и поры), определяется по зернистости и номеру структуры круга.

Известно [13], что число режущих зерен n_p в зависимости от давления круга на заготовку находится в пределах от 4 до 17 % от общего числа а.з. на рабочей поверхности круга. Следовательно,

примерно 83–96 % зерен составляют нережущие и давящие зерна. Л. А. Глейзер установил [2], что сумма режущих и пластически деформирующих а.з. для средних условий круглого наружного шлифования составляет около 24 % от общего числа зерен. Приняв n_p равным 10 %, получим, что 14 % зерен являются давящими (деформирующими):

$$n_d = 0,14 n_z, \quad (10)$$

где n_d – число пластически деформирующих абразивных зерен.

Усилие деформирования а.з. поверхностного слоя заготовки можно определить по формуле:

$$P_{a.z.} = P_y / n_d, \quad (11)$$

где P_y – осевая составляющая силы шлифования, Н.

Величину упрочненного в процессе шлифования слоя h_z'' можно приближенно определить по следующей зависимости [11]:

$$h_z'' = \sqrt{P_{A3} / 2 \sigma_T}. \quad (12)$$

Алгоритм расчета ТОН с учетом наследования остаточных напряжений в ПС, возникших в ходе выполнения i -ой операции механической обработки, можно построить на основе следующих соображений. Определим значение ТОН на некоторой глубине h_a шлифованной детали (см. рис.1). Выявим, в какой из областей (h_I или h_{II}) находятся искомые ТОН. Предположим, что значения h_I и h_{II} подобны h_z^I и h_z'' , т.е. $h_I / h_{II} = h_z^I / h_z''$. Сумма h_I и h_{II} равняется h_z'' . Следовательно, можно составить систему уравнений и получить из нее значения искомых величин:

$$\begin{cases} \frac{h_I}{h_{II}} = \frac{h_z^I}{h_z''} \\ h_I + h_{II} = h_z'' \end{cases}. \quad (13)$$

Пользуясь принципом подобия, определим глубину слоя залегания остаточных напряжений. При этом зависимость (1) примет следующий вид:

$$\text{при } h_a < h_I: \sigma_{i+1}(h_a) = K_H \sigma_i (Z_{i+1} - h_z^I [1 - h_a / h_I]) + \sigma_{i+1}^{TC}(h_a); \quad (14)$$

$$\text{при } h_I < h_a < h_z'': \sigma_{i+1}(h_a) = K_H \sigma_i (Z_{i+1} + h_I + h_a h_{II} / h_z'') + \sigma_{i+1}^{TC}(h_a). \quad (15)$$

На глубине $h_a > h_z''$ материал ПС не подвергается пластической деформации, следовательно, для расчетов ТОН необходимо использовать зависимость (1).

Как правило, окончательные операции технологического процесса изготовления деталей машин (шлифование, высокоскоростное тонкое точение, фрезерование и др.) отличаются высокими контактными температурами в зоне обработки. Последние не только являются одними из определяющих факторов, оказывающих влияние на образование в ПС заготовки новых (чаще всего растягивающих) ТОН, но и способны релаксировать уже имеющиеся напряжения. Вследствие этого коэффициент наследственности K_H также будет уменьшаться, причем на различных глубинах ПС степень его уменьшения может быть различна. Так на поверхности зоны контакта инструмента с заготовкой наблюдается максимальная температура, обусловленная выбранными элементами режима обработки, физико-механическими свойствами материалов инструмента и заготовки и функциональными свойствами и условиями применения смазочно-охлаждающих жидкостей. Однако, необходимо учитывать, что время теплового воздействия инструмента (резца, абразивного зерна) на поверхность заготовки будет минимальным. Это не позволит существенно снизить уровень ТОН. Теоретически в данной области ($h_a = 0$) K_H будет стремиться к максимуму (рис. 3). На глубине $0 < h_a < h_I$ максимальная температура будет постепенно уменьшаться, однако время ее воздействия несколько возрастет. Следовательно, в этом диапазоне глубин ПС ожидается уменьшение коэффициента K_H вплоть до минимальных значений. В области $h_I < h_a < h_z''$ время теплового воздействия будет продолжать расти, а максимальная температура – снижаться, что не позволит эффективно релаксировать ТОН. Следовательно, коэффициент наследования в этом диапазоне будет стремиться к максимуму. Таким образом, зная характер и время теплового воздействия, можно рассчитать коэффициент K_H на различных глубинах ПС заготовки и дать заключение о степени влияния ТОН, сформированных в ходе i -ой обработки.

Для описания процесса релаксации остаточных напряжений во времени воспользуемся уравнением Одингга-Надаи [7]:

$$\sigma_\tau = \sigma_0 e^{-\tau / \tau_0}, \quad (16)$$

где σ_τ – ТОН после релаксации, МПа; σ_0 – начальные ТОН, МПа; τ – время релаксации, с; τ_0 – время, в течение которого начальные ТОН убывают в 2,7 раз (e), с.

С. И. Губкин [3] для этих же целей предложил использовать следующую зависимость:

$$\sigma_\tau = \sigma_0 e^{-k \cdot \tau}, \quad (17)$$

где k – константа, характеризующая скорость релаксации:

$$k = \frac{E}{\eta}, \quad (18)$$

где E – модуль упругости 1-ого рода, МПа; η – коэффициент кинематической вязкости, Па/с.

Характер релаксации остаточных напряжений во времени в различных температурных интервалах специфичен. Ровинский Б.М. [9] установил, что релаксация слабо зависит от температуры в интервале (0,25...0,3) от температуры плавления $T_{пл}$ и не зависит от значений имеющихся в ПС остаточных напряжений.

При температурах от (0,25...0,3) $T_{пл}$ до 0,5 $T_{пл}$ активно развиваются процессы возврата, а ближе к верхнему уровню – рекристаллизации.

Скорость релаксации в этой температурной области находится в экспоненциальной зависимости от температуры [6]:

$$v = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\tau} = G e^{-\frac{Q}{RT}}, \quad (19)$$

где $\Delta\sigma$ – изменение ТОН за время $\Delta\tau$, МПа; G – модуль сдвига, МПа; Q – энергия активации релаксации, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,314$ Дж / моль К; T – температура, при которой происходит процесс релаксации, К.

$$\text{В результате: } \sigma_0 - \sigma_\tau = \tau G e^{-\frac{Q}{RT}}. \quad (20)$$

Эффективность релаксации определяется по зависимости [9]:

$$E_p = \frac{\sigma_0 - \sigma_\tau}{\sigma_0}. \quad (21)$$

При $E_p = 1$ можно говорить о полной релаксации ТОН, а при $E_p = 0$ – о ее отсутствии.

Подставив (20) в зависимость (21), получим следующее выражение для расчета эффективности релаксации:

$$E_p = \frac{\tau G}{\sigma_0 e^{\frac{Q}{RT}}}. \quad (22)$$

При температурах свыше 0,5 $T_{пл}$ начинается так называемая **высокотемпературная релаксация**. Однако, учитывая высокую температуру плавления титановых сплавов (~1600°C), наличие её при их обработке резанием и шлифованием маловероятно.

Энергию активации для реализации процесса релаксации приближенно можно определить следующим образом: из справочной литературы (например, [12]) выбирают элементы режима высокотемпературного отпуска (температуры T , время τ), соответствующие полному снятию ТОН в ПС ($E_p = 1$). При этом в качестве начальных напряжений σ_0 выбирают максимально возможные напряжения, соответствующие пределу текучести σ_τ материала обрабатываемой заготовки; из выражения (22) определяют энергию активации:

$$Q = R T \ln \frac{G \tau}{\sigma_0}. \quad (23)$$

Таким образом, для определения эффективности тепловой релаксации исходных ТОН в ПС обработанных заготовок необходимо выяснить характер температурного воздействия на различных глубинах ПС.

Общая эффективность релаксации на заданной глубине ПС, равной h_a , определяется по зависимости [9]:

$$E_p(h_a) = \frac{\sigma_H - \sigma_K}{\sigma_H}, \quad (24)$$

где σ_H – остаточные напряжения на глубине ПС, равной h_a , в начальный момент времени, МПа; σ_K – остаточные напряжения на глубине ПС, равной h_a , в момент прекращения релаксации (при температуре $\approx (0,25...0,3) T_{пл}$).

Коэффициент наследования можно рассчитать по формуле[5]:

$$K_n = 1 - E_p(h_a). \quad (25)$$

Расчет ТОН на различных глубинах ПС продолжается пока выполняется условие $T_p \geq (0,25...0,3) T_{пл}$, так как при более низких температурах эффективность релаксации определяется лишь временем. Этот процесс является достаточно длительным и при расчетах им можно пренебречь.

Исследования процессов технологического наследования проводили на образцах из жаропрочных ($\alpha+\beta$) титановых сплавов ВТ9 и ВТЗ-1, имеющих в своем составе α -титан и β -титан. Сплав ВТЗ-1 в качестве основного легирующего элемента содержит железо, количество которого почти в 3 раза больше, чем в ВТ9 (0,7% против 0,25%). Повышенное содержание железа увеличивает склонность титановых сплавов к образованию интерметаллидов состава TiFe и TiFe₂ [75]. В то же время ВТ9 характеризуются повышенным (по сравнению с ВТЗ-1) содержанием циркония (до 2% для ВТ9 и до 0,5% для ВТЗ-1).

Изменения фазового состава ПС оценивали по соотношению фаз α -Ti и β -Ti на приборе рентгеновского типа Рикор-7. Соотношение фазы α -Ti к фазе β -Ti определяли по формуле:

$$k = \frac{I_{\alpha-Ti1} + I_{\alpha-Ti2}}{I_{\beta-Ti1} + I_{\beta-Ti2}}, \quad (26)$$

где $I_{\alpha-Ti1}$, $I_{\beta-Ti1}$ – интенсивность пиков α и β – фаз при угле наклона трубки 19.7°; $I_{\alpha-Ti2}$, $I_{\beta-Ti2}$ – интенсивность пиков α и β – фаз при угле наклона трубки 27.3°.

Изменение данного соотношения в процессе формообразования нежестких деталей свидетельствует о фазовых превращениях в ПС, возникающих под действием теплосиловой напряженности процесса обработки. Полученная информация позволяет выявить причины формирования ТОН. Фаза β -Ti является упрочняющей. Увеличение данной фазы свидетельствует об изменении объемно-центрируемой кубической кристаллической решетки (ОЦК). Последнее вызывает увеличение прочностных свойств в ПС металла готовой детали. Фаза α -Ti имеет гексагональную плотноупакованную кристаллическую решетку (ГПУ), наличие этой фазы может привести к разупрочнению ПС. Положительное влияние α -Ti заключается в повышении химической стойкости поверхности. Оценка соотношения этих фаз позволяет оценить, какие явления происходят в ПС обрабатываемых заготовок: упрочнение или разупрочнение.

Все заготовки подвергали комбинированной обработке точением и УЗТВ [5], после чего шлифовали врезной подачей и подводом СОЖ к зоне обработки сквозь поры круга через клиновой полукруглый насадок с наложением УЗ колебаний [4]. Значения элементов режима комбинированной обработки определяли в ходе предварительных исследований таким образом, чтобы обеспечивать в ПС обработанных заготовок максимально и минимально возможные, а также средние по абсолютной величине сжимающие ТОН на глубине припуска $Z_{\text{шл}}$, оставленного для последующего шлифования. Это необходимо для точного расчета коэффициента наследования ТОН при наименьших временных и материальных затратах на проведение натурных экспериментов. ТОН измеряли с использованием прибора Ситон-АРМ.

Введение в зону формообразования деталей энергии УЗ поля на всех технологических операциях и переходах объяснялось стремлением осуществить бездефектную обработку титановых заготовок на высокопроизводительных режимах резания.

Из схем, представленных на рис. 1 и 2 следует, что ТОН, сформированные на глубине припуска под последующее шлифование, оказывают существенное влияние на напряженно-деформированное состояние ПС шлифованных образцов.

Достаточно полную и оперативную информацию о степени влияния технологического наследования на ТОН в ПС заготовок может дать коэффициент наследования K_n .

Рассчитанные с использованием экспериментальных данных и приведенные на рис. 3 коэффициенты наследования остаточных напряжений, представлены на рис. 4 в виде графических зависимостей для глубины залегания ТОН от 0 до 50 мкм. Общеизвестно, что остаточные напряжения на глубине ПС до 50 мкм в наибольшей степени определяют эксплуатационные свойства готовых деталей.

Как следует из данных рис. 4, на поверхности заготовки ($h_a = 0$) K_n стремится к 1 (т.е. релаксация практически отсутствует и остаточные напряжения полностью переносятся с предшествующей операции механической обработки заготовки). На большей глубине наблюдается значительное (для титанового сплава ВТ9) снижение величины K_n . Однако, на глубине ПС порядка 30...40 мкм коэффициент наследования и вновь начинает расти.

На рис. 5 показаны диаграммы, иллюстрирующие ТН фазового состава ПС заготовок из титановых сплавов ВТ9 и ВТЗ-1. Столбцы 1' – 6' показывают соотношение объемов фаз α - и β - титана в шлифованных образцах, предварительно подвергнутых комбинированной обработке точением и УЗТВ на разных элементах режима.

Рис. 5. Изменение фазового состава поверхностного слоя заготовок из сплавов ВТ9 (а, б) и ВТЗ-1 (в, г) в ходе комбинированной обработки точением и УЗТВ (1–6) и шлифованием (1'–6'): 1 – $t = 1$ мм, $V_3 = 57.4$ м/мин, $S = 0.054$ мм/об, $P = 100$ Н; 2 – $t = 0.75$ мм, $V_3 = 45.5$ м/мин, $S = 0.046$ мм/об, $P = 300$ Н; 3 – $t = 0.5$ мм, $V_3 = 36.4$ м/мин, $S = 0.064$ мм/об, $P = 200$ Н; 4 – $t = 0.75$ мм, $V_3 = 63.5$ м/мин, $S = 0.064$ мм/об, $P = 300$ Н; 5 – $t = 0.5$ мм, $V_3 = 50.8$ м/мин, $S = 0.046$ мм/об, $P = 100$ Н; 6 – $t = 1$ мм, $V_3 = 40.6$ м/мин, $S = 0.054$ мм/об, $P = 200$ Н

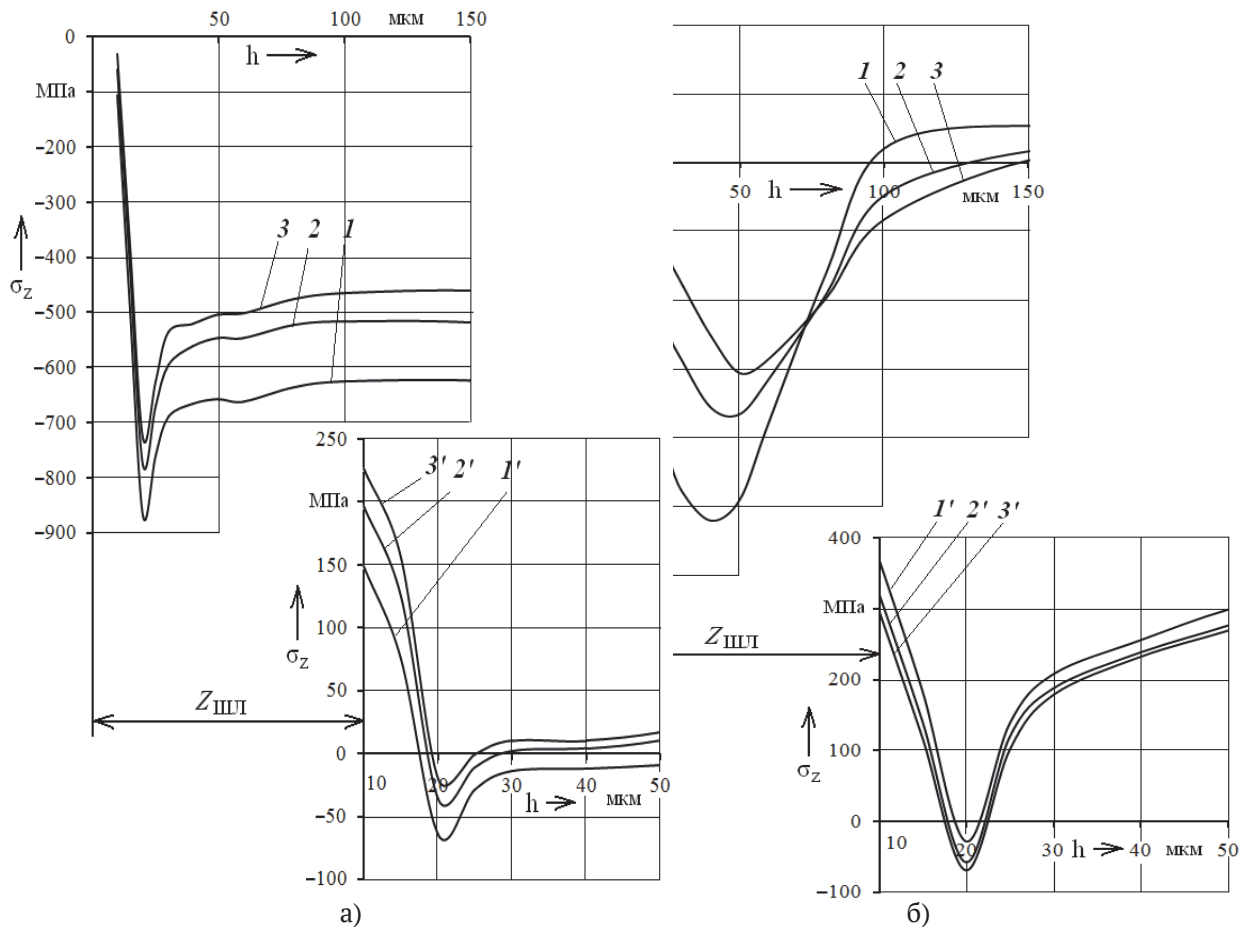


Рис. 3. Остаточные напряжения в поверхностном слое заготовок из титанового сплава ВТ9 при различных режимах комбинированной обработки точением и УЗТВ (а) и врезного шлифования (б): 1 – $t = 1$ мм, $V_s = 57.4$ м/мин, $S = 0.054$ мм/об, $P = 100$ Н; 2 – $t = 0.75$ мм, $V_s = 45.5$ м/мин, $S = 0.046$ мм/об, $P = 300$ Н; 3 – $t = 0.5$ мм, $V_s = 36.4$ м/мин, $S = 0.064$ мм/об, $P = 200$ Н; 1, 2, 3 – ТОН после комбинированной обработки; 1', 2', 3' – ТОН после врезного шлифования (круг 63С16Н7К5, $V_k = 35$ м/с, $V_z = 35$ м/мин, $V_t = 0.2$ мм/мин, СОЖ-5% эмульсия Аквол-6)

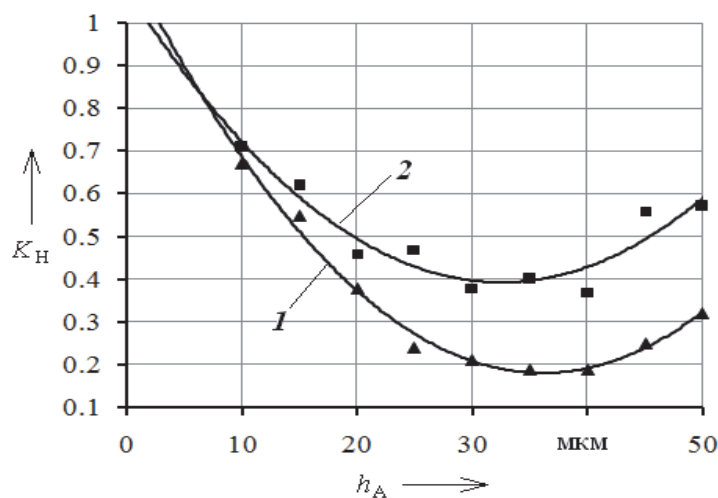


Рис. 4. Графики изменения коэффициента наследования остаточных напряжений K_n по глубине поверхностного слоя заготовок: 1 – ВТ3-1 (▲); 2 – ВТ9 (■)

Результаты фазового состава α - и β - титана после комбинированной обработки и шлифования имеет схожий характер, что наглядно свидетельствует о технологическом наследовании ФС материала поверхностного слоя титановых образцов. Таким образом, формируя на этапе комбиниро-

ванной обработки наименьший объем α -Ti (столбцы 3 и 6 на рис. 5) можно обеспечить максимально возможный (в определенных пределах) объем β -титана и после последующего врезного шлифования (столбцы 3' и 6' на рис. 5).

Согласно [6], наибольшее влияние на эффективность ультразвукового снятия ТОН оказывает время релаксации τ и усилие прижима индентора P . Экспериментальные исследования эффективности УЗ-релаксации ТОН проводили после операции круглого наружного шлифования на установке для комбинированной обработке, аналогичной отличающейся лишь отсутствием токарного резца.

Как следует из результатов исследований, эффективность УЗ-релаксации существенно зависит от времени «озвучивания». Причем разница в скорости релаксации (МПа/мин) для материалов, использованных при исследованиях, примерно одинакова и составляет (70...80) МПа/мин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования позволяют следующие выводы.

- Коэффициент технологического наследования K_H изменяется по глубине ПС обработанной заготовки, что связано с различной степенью температурной релаксации ТОН, сформировавшихся в ходе предварительной технологической операции.

- На эффективность тепловой релаксации и, как следствие, увеличение или снижение коэффициента наследования K_H в наибольшей степени оказывают влияние физико-механические свойства самого материала обрабатываемой заготовки и элементы режима окончательной обработки, определяющие время и температуру воздействия.

- Введение в зону формообразования энергии УЗ колебаний позволяет интенсифицировать элементы режима бездефектной обработки заготовок из титановых сплавов, а следовательно, и оказывать влияние на коэффициент наследования K_H .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев, А.С. Направленное формирование свойств изделий машиностроения / А.С. Васильев, А.М. Дальский, Ю.М. Золотаревский и др. – М.: Машиностроение, 2005. – 352 с.
2. Глейзер, Л.А. О сущности процесса круглого шлифования / Л.А. Глейзер // Вопросы точности в технологии машиностроения. – М.: Станкин, 1959. – С. 5 – 24.
3. Губкин, С.И. Пластическая деформация металлов. Т.1 / С.И. Губкин. – М.: Металлургиздат, 1961. – 376 с.
4. 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.
5. Киселев, Е.С. Управление формированием остаточных напряжений при изготовлении ответственных деталей: монография / Е.С. Киселев, О.В. Благовский. – СПб.: Лань, 2020. – 140 с.
6. Коттрелл, А.Х. Дислокации и пластическое течение в кристаллах / А.Х. Коттрелл. – М.: Металлургиздат, 1958. – 390 с.
7. Одинг, И.А. Исследования жаропрочных сталей и сплавов / И.А. Одинг, Ф.И. Алешкин. – М.: Наука. – 1964. – № 9 – С. 63.
8. Подураев, В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов: Учеб. пособие для вузов / В.Н. Подураев. – М.: Высшая школа, 1974. – 310 с.
9. Ровинский, Б.М. Влияние термомеханической обработки на релаксационную стойкость сталей и сплавов / Б.М. Ровинский // Известия ОТН АН СССР. – 1954. – №2. – С. 67.
10. Смелянский, В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В.М. Смелянский. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.
11. Торбило, В.М. Алмазное выглаживание / В.М. Торбило. – М.: Машиностроение, 1972. – 104 с.
12. Хейфец, М.Л. Технологическое наследование физико-механических и геометрических параметров качества материала и поверхности детали / М.Л. Хейфец, А.С. Васильев, С.А. Клименко, Л. Танович // Современные наукоемкие технологии, оборудование и инструменты в машиностроении: сб. трудов международной НТК. – СПб.: Изд-во политехнического университета, 2014. – С. 275-285.
13. Ящерицын, П.И. Технологическая наследственность в машиностроении / П.И. Ящерицын, Э.В. Рыжов, В.И. Аверченков. – Минск: Наука и техника, 1977. – 255 с.

TECHNOLOGICAL INHERITANCE IN THE MANUFACTURE OF NON-RIGID TITANIUM ALLOY PARTS DURING CUTTING IN THE ULTRASONIC FIELD

© 2025 E.S. Kiselyov¹, A.R. Nigmatullin²

¹Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

²Samara State Technical University, Samara, Russia

The issues related to solving the problem of directed formation of technological residual stresses and the phase composition of the surface layer of non-rigid titanium alloy parts during machining are considered, taking into account technological heredity when ultrasonic vibrations are introduced into the shaping zone. New methods are proposed for the technological provision of a given level of residual stresses and the phase composition of the surface layer of thin-walled titanium parts through the rational use of ultrasonic field energy. The effectiveness of thermal relaxation and, as a result, an increase or decrease in the coefficient of inheritance of KN depends most on the physical and mechanical properties of the material of the workpiece being processed, the presence of ultrasonic vibrations in the shaping zone and the elements of the final processing mode that determine the time and temperature of exposure. New methods are proposed for the technological provision of a given level of residual stresses and the phase composition of the surface layer of thin-walled titanium parts through the rational use of ultrasonic field energy. It is established that the coefficient of technological inheritance KN differs in the depth of the surface layer of the processed workpiece, which is associated with varying degrees of temperature relaxation of residual stresses formed during the preliminary technological operation.

Keywords: technological inheritance; ultrasound, residual stresses, phase composition, heat-power tension, relaxation, titanium alloys.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3(2)-246-254

EDN: QXNGNE

The research was carried out using financial resources from the Russian Science Foundation, grant No. 24-29-00206, <https://rscf.ru/project/24-29-00206/Acknowledgements>

REFERENCES

1. Vasil'ev, A.S. Napravlennoe formirovanie svojstv izdelij mashinostroeniya / A.S. Vasil'ev, A.M. Dal'skij, Yu.M. Zolotarevskij i dr. – M.: Mashinostroenie, 2005. – 352 s.
2. Glejzer, L.A. O sushchnosti processa kruglogo shlifovaniya / L.A. Glejzer // Voprosy tochnosti v tekhnologii mashinostroeniya. – M.: Stankin, 1959. – S. 5 – 24.
3. Gubkin, S.I. Plasticheskaya deformaciya metallov. T.1 / S.I. Gubkin. – M.: Metallurgizdat, 1961. – 376 s.
4. Kiselev, E.S. Mekhanicheskaya obrabotka zagotovok v usloviyah kriticheskogo teplomassoperenosa. Izbrannye trudy Rossijskoj shkoly po problemam nauki i tekhnologij / E.S. Kiselev, V.N. Koval'nogov. – M.: RAN, 2008. – 250 s.
5. Kiselev, E.S. Upravlenie formirovaniem ostatochnyh napryazhenij pri izgotovlenii otvetstvennyh detalej: monografiya / E.S. Kiselev, O.V. Blagovskij. – SPb.: Lan', 2020. – 140 s.
6. Kottrell, A.X. Dislokacii i plasticheskoe techenie v kristallah / A.X. Kottrell. – M.: Metallurgizdat, 1958. – 390 s.
7. Oding, I.A. Issledovaniya zharoprochnykh stalej i splavov / I.A. Oding, F.I. Aleshkin. – M.: Nauka. – 1964. – № 9 – S. 63.
8. Poduraev, V.N. Rezanie trudnoobrabatyvaemykh materialov: Ucheb. posobie dlya vuzov / V.N. Poduraev. – M.: Vysshaya shkola», 1974. – 310 c.
9. Rovinskij, B.M. Vliyanie termomekhanicheskoy obrabotki na relaksacionnyu stojkost' stalej i splavov / B.M. Rovinskij // Izvestiya OTN AN SSSR. – 1954. – №2. – S. 67.
10. Smelyanskij, V.M. Mekhanika uprochneniya detalej poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem / V.M. Smelyanskij. – M.: Mashinostroenie, 2002. – 300 s.
11. Torbilo, V.M. Almaznoe vyglazhivanie / V.M. Torbilo. – M.: Mashinostroenie, 1972. – 104 s.
12. Hejfec, M.L. Tekhnologicheskoe nasledovanie fiziko-mekhanicheskikh i geometricheskikh parametrov kachestva materiala i poverhnosti detali / M.L. Hejfec, A.S. Vasil'ev, S.A. Klimenko, L. Tanovich // Sovremennye naukoemkie tekhnologii, oborudovanie i instrumenty v mashinostroenii: sb. trudov mezhdunarodnoj NTK. – SPb.: Izd-vo politekhnicheskogo universiteta, 2014. – S. 275-285.
13. Yashchericyn, P.I. Tekhnologicheskaya nasledstvennost' v mashinostroenii / P.I. Yashchericyn, E.V. Ryzhov, V.I. Averenkov. – Minsk: Nauka i tekhnika, 1977. – 255 s.

Evgeny Kiselev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Leading Researcher, Department of Scientific Research.

E-mail: kec.ulstu@mail.ru

Almir Nigmatullin, Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Machine Tools, and Tools.