

УДК 621.941.01

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ КОМБИНИРОВАННОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ЗАДАННЫХ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ¹

© Е. С. Киселев, О. В. Благовский²*Статья поступила 23 декабря 2014 г.*

Представлены результаты исследований фазового состава и технологических остаточных напряжений в поверхностном слое заготовок из двухфазных титановых сплавов после их комбинированной обработки точением и ультразвуковым твердосплавным выглаживанием. Контроль параметров качества проводили на современном оборудовании неразрушающими методами. Полученные данные показали, что изменение элементов режима комбинированной обработки значительно влияет на остаточные напряжения и соотношение α - и β -титана в поверхностном слое, а сама обработка — эффективный инструмент для достижения заданных параметров качества. При этом скорость вращения заготовки оказывает противоположное влияние на параметры качества поверхностного слоя образцов из рассматриваемых материалов. На взгляд авторов, это связано с образованием интерметаллидов вида А.

Ключевые слова: титановый сплав; фазовый состав; остаточные напряжения; поверхностный слой; механическая обработка; ультразвук.

Все более широкое распространение в качестве конструкционных материалов деталей различных машин и механизмов, прежде всего летательных аппаратов и высокоскоростного водного и наземного транспорта, получают титановые сплавы ($\alpha + \beta$)-класса (BT3-1, BT9, BT22 и др.). Их отличительная особенность — оптимальное сочетание свойств α -титана, имеющего кубическую гранецентрированную решетку (мягкая и пластичная фаза), и β -титана с гексагональной плотноупакованной решеткой (твердая и хрупкая фаза). Фазовые превращения типа α -Ti $\rightarrow$ β -Ti в поверхностном слое (ПС) заготовок начинаются уже при температуре около 880 °С, что в совокупности с низкой теплопроводностью обеспечивает таким сплавам хорошие эксплуатационные свойства, но создает значительные трудности при механической обработке деталей из них [1]. В частности общеизвестно, что при обработке заготовок из титановых сплавов велика вероятность возникновения растягивающих остаточных напряжений.

Заключительные операции технологического процесса обработки заготовок (шлифование или тонкое точение), обеспечивающие необходимую размерную точность и малые значения высотных параметров шероховатости ПС, как правило, сопровождаются высокими контактными температурами в зоне резания. Последние — причина фазовых переходов и измене-

ний фазового состава (ФС) ПС и, как следствие, возникновения нежелательных растягивающих технологических остаточных напряжений (ТОН).

Известные методы управления величиной и знаком ТОН и ФС ПС заготовок из таких материалов в действующем производстве связаны, как правило, с высокими энергетическими и временными затратами или же с потерей производительности механической обработки и увеличением длительности производственного цикла (уменьшением значений элементов режима обработки для снижения теплообразования и временной естественной релаксации ТОН).

Цель данной работы — оценить возможность обеспечения требуемого уровня ТОН и ФС поверхностного слоя при сохранении заданной точности и других параметров качества ПС деталей машин путем рационального использования возможностей комбинированной обработки с применением энергии ультразвукового (УЗ) поля, в частности, путем обработки точением с одновременным ультразвуковым твердосплавным выглаживанием (УЗТВ) на предварительных операциях [3]. УЗТВ, по мнению авторов, позволяет создать в ПС заготовки сжимающие ТОН, способные нивелировать негативное действие образующихся при высокоскоростной лезвийной или абразивной обработке, прежде всего, растягивающих напряжений. Схема комбинированной обработки, выполняемой на токарном станке, представлена на рис. 1.

Образцами для экспериментальных исследований служили валики из двух существенно отлича-

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 14-08-01059а.

² Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия.

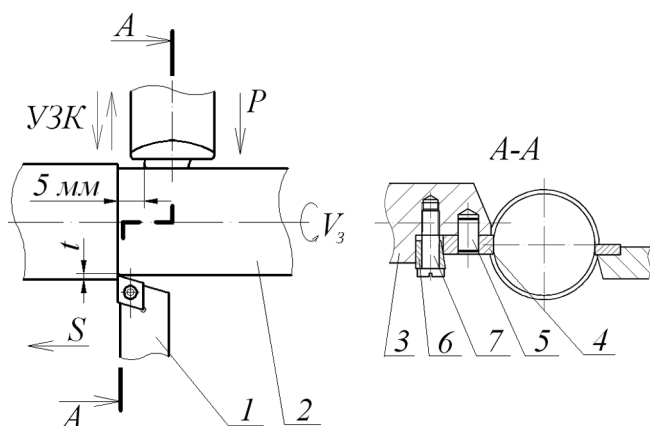


Рис. 1. Схема установки для комбинированной обработки точением и УЗТВ: 1 — резец; 2 — заготовка; 3 — концентратор; 4 — твердосплавный выглаживатель; 5 — штифт; 6 — клин; 7 — винт



Рис. 3. Рикор-7: 1 — гониометрический узел; 2 — рентгеновская трубка; 3 — персональный компьютер; 4 — детектор; 5 — вычислительный блок; 6 — заготовка



Рис. 2. СИТОН-АРМ: 1 — измерительный комплекс; 2 — датчик; 3 — заготовка

ющихся по химическому составу титановых сплавов ($\alpha + \beta$)-класса: жаропрочного ВТЗ-1 (диаметром 58 мм и длиной 250 мм) и наиболее жаростойкого ВТ9 (диаметром 50 мм и длиной 200 мм).

Обработку осуществляли на токарно-винторезном станке повышенной точности УТ16П с подачей к зоне контакта инструмента с заготовкой 3 %-го водного раствора концентрата полусинтетической смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) Велс-1 (расход — 10 л/мин). На стадии комбинированной обработки поверхностно-пластическое деформирование выполняли с подачей в зону контакта твердосплавного выглаживателя с заготовкой 100 %-го концентрата СОЖ Велс-1 (расход — 5 г/ч) путем нанесения его на контактирующие объекты кистью [2].

УЗ-колебания частотой $f = 22$ кГц и амплитудой $A = 6 - 8$ мкм накладывали на твердосплавный выглаживатель от УЗ-генератора УЗГ-641А.

ТОН обработанных деталей измеряли при помощи измерительно-вычислительного комплекса «СИТОН-АРМ» (г. Санкт-Петербург), предназначенного для автоматизированного неразрушающего контроля остаточных напряжений в ПС изделий из металлов и сплавов (рис. 2). Комплекс обеспечивает возможность построения эпюры остаточных напряжений с точностью до 25 МПа по результатам сканирования удельной электропроводности ПС детали из титановых сплавов на 16 глубинах — от 10 до 500 мкм.

Фазовый состав определяли неразрушающим бесконтактным способом на рентгеновском измерительном комплексе «Рикор-7» (г. Москва) через отношение объемов α - и β -фаз (V_α/V_β) в ПС обработанных заготовок (рис. 3).

Соотношение объемов фаз α - и β -титана оценивали по измерениям интенсивности пиков на следующих кристаллографических плоскостях: для α -титана — {002}, {101}, {102} (стандартные углы дифракции 2θ — 38,5, 40,2 и 53° соответственно); для β -титана — {110} и {200} (стандартные углы дифракции 2θ — 38,8 и 56° соответственно).

Результаты экспериментальных исследований ФС образцов в зависимости от глубины резания t , окружной скорости вращения заготовки V_3 , продольной подачи S и усилия прижима выглаживателя P представлены на рис. 4 – 7.

Наибольшее влияние на изменение ФС ПС заготовок и величины ТОН при комбинированной обработке, как следует из анализа полученных экспериментальных данных, оказывает глубина резания t (см. рис. 4), увеличение которой способствует существенному сокращению α -фазы по сравнению с β -фазой в ПС заготовок из обоих рассматриваемых сплавов. На наш взгляд, это связано с возрастанием температуры в зоне обработки и ускорением превращений типа $\alpha\text{-Ti} \rightarrow \beta\text{-Ti}$.

Приведенные на рис. 4, б результаты исследований по оценке влияния комбинированной обработки точением и УЗТВ с различной глубиной резания t на остаточные напряжения в ПС заготовок из титанового

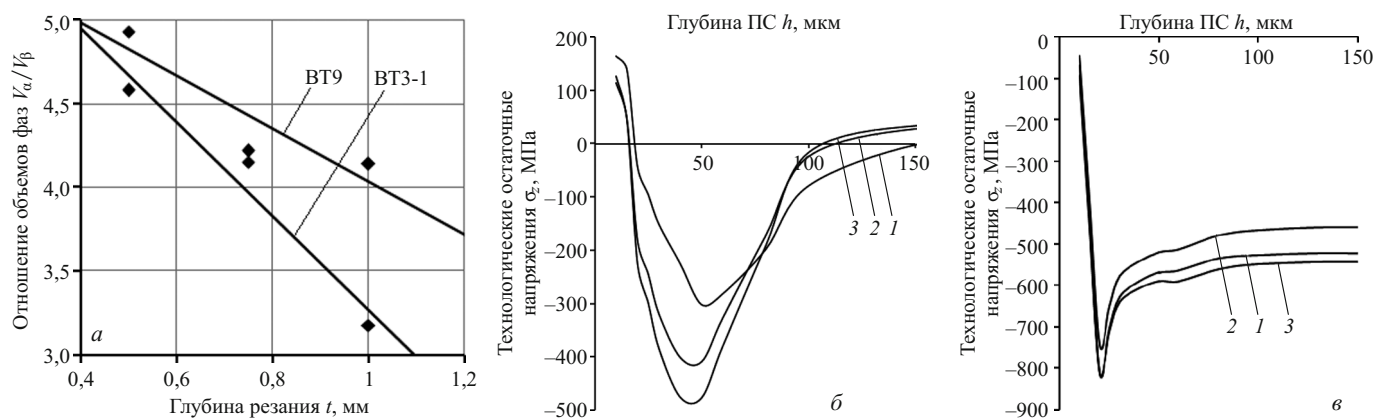


Рис. 4. Зависимости соотношения объемов α - и β -титана V_α/V_β (а) и распределения остаточных напряжений σ_z в ПС (б — BT9; в — BT3-1) от глубины резания (при точении) t , мм: 1 — 0,5; 2 — 0,75; 3 — 1,0 (остальные элементы режима обработки: $V_3 = 45,5$ м/мин; $S = 0,054$ мм/об; $P = 200$ Н)

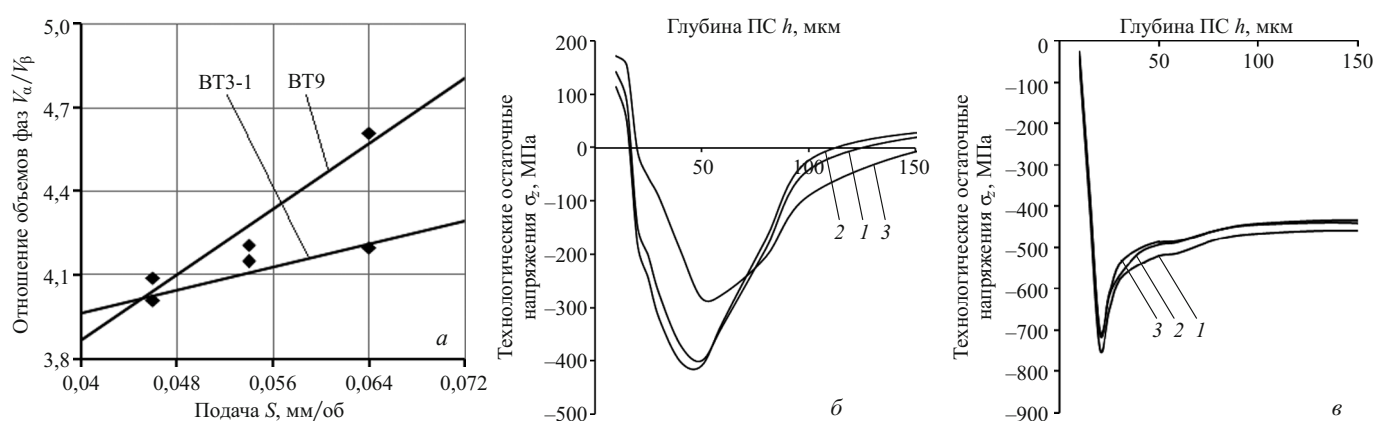


Рис. 5. Зависимости соотношения объемов α - и β -титана V_α/V_β (а) и распределения остаточных напряжений σ_z в ПС (б — BT9; в — BT3-1) от подачи S , мм/об: 1 — 0,046; 2 — 0,054; 3 — 0,064 (остальные элементы режима обработки: $t = 0,75$ мм; $V_3 = 45,5$ м/мин; $P = 200$ Н)

сплава BT9 демонстрируют, что до глубины 80 мкм сжимающие напряжения с ростом t увеличиваются (ПС упрочняется). На глубине ПС свыше 80 мкм вследствие перераспределения ТОН наблюдается обратная зависимость: с увеличением глубины резания ТОН из сжимающих переходят в растягивающие.

Увеличение глубины резания при обработке заготовок из сплава BT3-1 на первоначальном этапе приводит к снижению величины сжимающих напряжений вследствие роста температур и образования β -фазы (см. рис. 4, а). Однако дальнейшее увеличение t и связанный с этим рост радиальной составляющей силы обработки приводят к возрастанию количества дислокаций в материале ПС и, как следствие, формированию больших величин сжимающих ТОН.

С увеличением продольной подачи S (см. рис. 5, а) и усилия прижима выглаживателя P (см. рис. 6, а) происходит распад β -титана — активизация обратного перехода $\beta\text{-Ti} \rightarrow \alpha\text{-Ti}$. Это приводит к упрочнению материала ПС (снижению растягивающих напряжений в заготовках из сплава BT9 и росту сжимающих напряжений для сплава BT3-1). По-видимому, это объясняется интенсификацией процессов пластической

деформации и распадом β -титана под воздействием давления в зоне контакта инструмента с заготовкой.

Однако стоит отметить, что при повышении усилия прижима выглаживателя до 300 Н наблюдается некоторое снижение уровня сжимающих ТОН, что свидетельствует о начале разупрочнения материала ПС вследствие перенаклепа.

На рис. 5, б показано влияние изменений подачи S на характер распределения и величину ТОН в ПС заготовок из сплава BT9 при комбинированной обработке точением и УЗТВ. Как и в случае с глубиной резания (см. рис. 4, б), до глубины 70 мкм наблюдается рост сжимающих напряжений с увеличением параметра S , но вследствие перераспределения ТОН на глубине свыше 70 мкм проявляется обратная зависимость. Рост сжимающих напряжений может быть связан с распадом β -титана и переходом его в α -фазу.

Увеличение усилия прижима индентора P при комбинированной обработке заготовок из сплава BT9 (см. рис. 6, б) приводит к возрастанию абсолютной величины сжимающих ТОН, что объясняется ростом количества дислокаций в ПС, а также интенсификацией обратного фазового перехода $\beta \rightarrow \alpha$ под действием

контактного давления в зоне выглаживания. А поскольку контактные температуры при УЗТВ крайне малы, то релаксация полученных напряжений вследствие отпускных процессов незначительна.

При увеличении усилия прижима индентора до 200 Н при обработке образцов из титанового сплава ВТ3-1 (см. рис. 6, б) наблюдается увеличение абсолютного значения сжимающих остаточных напряжений. Однако данные, полученные после обработки с $P = 300$ Н, демонстрируют снижение сжимающих ТОН, что, на взгляд авторов, связано с увеличением температуры обработки, началом отпускного разупрочнения ПС и может быть отнесено к особенностям данного сплава, выражающимся в доминировании теплового фактора при формировании остаточных напряжений.

Рост окружной скорости вращения заготовки V_3 также по-разному оказывает влияние на изменение ФС ПС рассматриваемых сплавов (см. рис. 7). Для заготовок из сплава ВТ3-1 увеличение скорости V_3 способствует образованию α -фазы и росту нежелательных растягивающих остаточных напряжений, в то время как для сплава ВТ9 эта зависимость носит

обратный характер — с увеличением скорости активизируется распад β -фазы. На наш взгляд, это объясняется различиями в химическом составе сплавов. Так, сплав ВТ3-1 в качестве основного легирующего элемента содержит железо, количество которого практически 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 $TiFe_2$ [1]. В то же время ВТ9 характеризуется повышенным (по сравнению с ВТ3-1) содержанием циркония (до 2 % у ВТ9 и до 0,5 % у ВТ3-1). Подобные различия, а также существенное возрастание контактных температур при увеличении скорости вращения заготовки обуславливают противоположный характер изменения ФС материала ПС образцов.

Из результатов исследований следует, что на напряженно-деформированное состояние ПС заготовок из рассматриваемых сплавов скорость вращения заготовки V_3 оказывает незначительное влияние (см. рис. 7, б, в). Причем ее повышение вызывает снижение абсолютной величины сжимающих остаточных напряжений, что, вероятно, связано с существенным

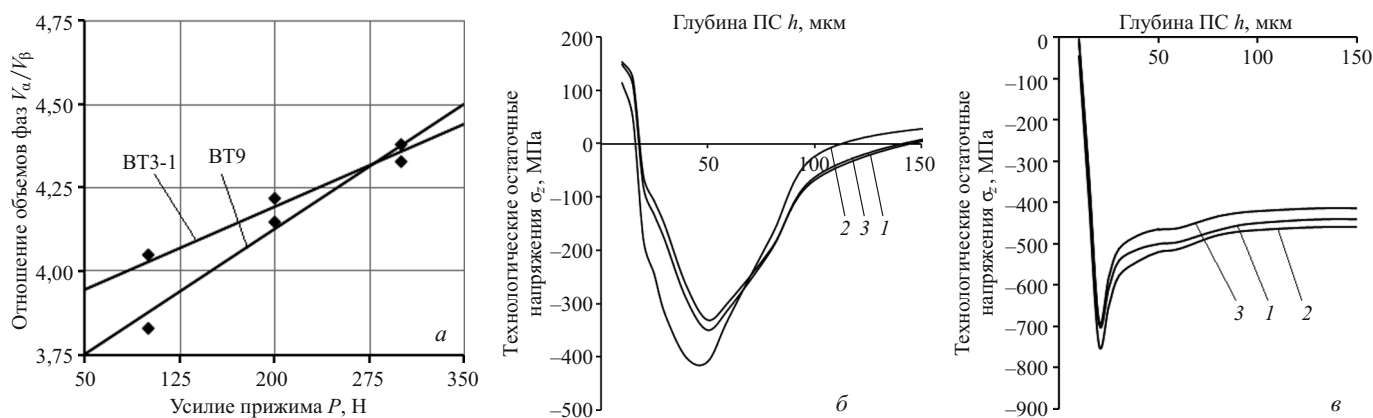


Рис. 6. Зависимости соотношения объемов α - и β -титана V_α/V_β (а) и распределения остаточных напряжений σ_z в ПС (б — ВТ9; в — ВТ3-1) от усилия прижима выглаживателя P , Н: 1 — 100; 2 — 200; 3 — 300 (остальные элементы режима обработки: $t = 0,75$ мм; $V_3 = 45,5$ м/мин; $S = 0,054$ мм/об)

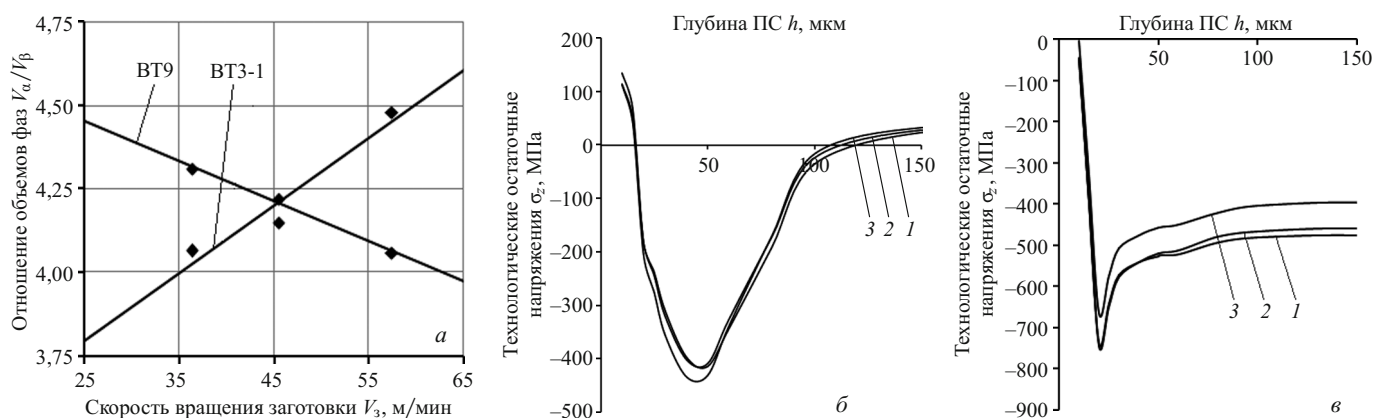


Рис. 7. Зависимости соотношения объемов α - и β -титана V_α/V_β (а) и распределения остаточных напряжений σ_z в ПС (б — ВТ9; в — ВТ3-1) при изменении скорости вращения заготовки V_3 , м/мин: 1 — 36,4; 2 — 45,5; 3 — 57,4 (остальные элементы режима обработки: $t = 0,75$ мм; $S = 0,054$ мм/об; $P = 200$ Н)

ростом теплонапряженности процесса комбинированной обработки и интенсификацией структурно-фазовых переходов.

Таким образом, использование комбинированной обработки точением и УЗТВ на предварительных операциях технологического процесса — эффективный способ достижения заданного качества ПС заготовок из титановых сплавов. Однако различные элементы режима обработки по-разному влияют на соотношение α - и β -фаз разных по химическому составу сплавов. Поэтому к их назначению следует подходить с учетом заданных технических требований, стремясь обеспечить не только требуемый уровень остаточных напряжений и ФС ПС, но и максимально возможную производительность обработки. Как показали результаты исследований, наибольшие резервы для этой цели открываются при варьировании глубины резания t и усилия прижима твердосплавного выглаживателя P .

ЛИТЕРАТУРА

1. Цвиккер У. Титан и его сплавы. — М.: Металлургия, 1979. — 362 с.
2. Киселев Е. С., Ковальногов В. Н. Механическая обработка заготовок в условиях критического тепломассопереноса. — М.: РАН, 2008. — 250 с.
3. Киселев Е. С. Интенсификация процессов механической обработки использованием энергии ультразвукового поля. — Ульяновск: УлГТУ, 2003. — 186 с.

REFERENCES

1. Tsvikker U. Titan i ego splavy [Titanium alloys]. — Moscow: Metallurgiya, 1979. — 362 p. [in Russian].
2. Kiselev E. S., Koval'nogov V. N. Mekhanicheskaya obrabotka zagotovok v usloviyakh kriticheskogo teplomassoperenosa [Mechanical treatment of workpieces in a critical heat and mass transfer conditions]. — Moscow: Izd. RAN, 2008. — 250 p. [in Russian].
3. Kiselev E. S. Intensifikatsiya protsessov mekhanicheskoi obrabotki ispol'zovaniem énergii ultrazvukovogo polya [Intensification of machining processes by using ultrasonic energy]. — Ulyanovsk: Izd. UIGTU, 2003. — 186 p. [in Russian].