

Ф. П. УРЫВСКИЙ, Б. С. КОРОТИН

КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ ЖАРОПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Наклеп и остаточные напряжения, получающиеся после механической обработки, являются важными показателями качества обработанной поверхности, оказывающими значительное влияние на усталостную прочность и долговечность деталей. В настоящее время еще недостаточно изучено влияние элементов режима резания, геометрии и износа инструмента на величину и характер остаточных напряжений и наклеп. Изучение указанных вопросов представляет особую важность при обработке жаропрочных материалов, склонных к значительным пластическим деформациям в процессе их изготовления и работающих при высоких динамических и температурных нагрузках. Установление причин, способствующих образованию остаточных напряжений и наклепа обработанной поверхности дает возможность определять режимы механической обработки и геометрию инструмента с учетом особенностей работы деталей.

В настоящей статье приводятся результаты исследования наклепа и остаточных напряжений при токарной обработке титановых сплавов ВТЗ-1, ВТ14 и жаропрочной стали ЭИ787, а также сделана попытка объяснить некоторые явления, на основании связи между температурой в зоне резания и остаточными напряжениями*.

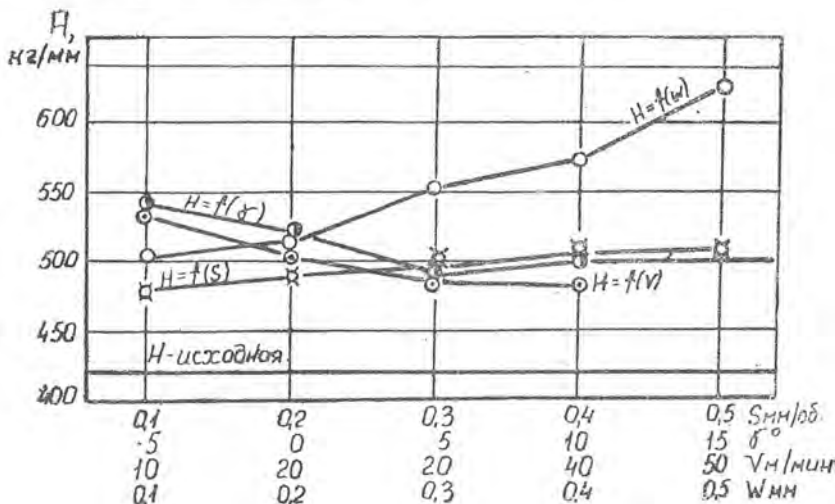
* Работа выполнена под руководством проф. Н. И. Резникова. В проведении экспериментов и обработке результатов опытов принимали участие инж. Л. А. Сухицина, мастер В. Ф. Парамонов, мастер И. Г. Мягких.

Степень и толщина наклепа исследовались в зависимости от элементов режима резания, геометрии и величины износа инструмента. Образцы изготавливались на токарном станке 1А62 твердосплавными резцами ВК6М с оптимальной геометрией: $\gamma = 10^\circ$; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$; $\alpha = 10^\circ$; $\lambda = 0$; $r = 1$.

Жаропрочная сталь ХН35ВТ10 (ЭИ787) по ГОСТ 5632-61, применявшаяся в опытах, имела следующие механические свойства: $\sigma_b = 120$ кг/мм², $\sigma_s = 85$ кг/мм²; $\delta = 9\%$; $\psi = 23\%$ НВ320. Титановые сплавы: ВТЗ-1 $\sigma_b = 105$ кг/мм²; $\sigma_s = 100$ кг/мм²; $\delta = 10\%$; $\psi = 25\%$ НВ321. ВТ14 $\sigma_b = 92$ кг/мм²; $\sigma_s = 90$ кг/мм²; $\delta = 14\%$; $\psi = 31\%$ НВ248.

Глубина наклепа определялась измерением микротвердости на поверхности косых срезов, получаемых шлифованием с последующей притиркой образцов пастами ГОИ на чугуных плитах.

Микротвердость замерялась на приборе ПМТ-3 при нагрузке 100 г. Для уменьшения влияния случайных погрешностей на результат измерения размеры отпечатков и их расположение измерялись по три раза, а затем принималась среднеарифметическая величина.



Фиг. 1. Влияние режима резания, износа инструмента и переднего угла на изменение твердости поверхностного слоя при точении стали ЭИ787.

Интенсивность наклепа определялась по формуле:

$$N = \frac{H_m - H'_m}{H'_m} 100 \%,$$

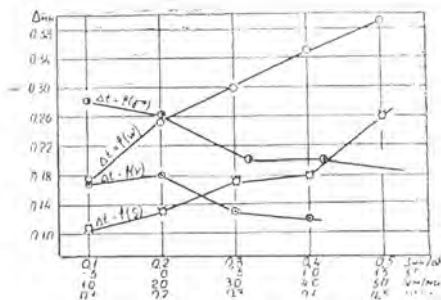
где N — степень наклепа;

H'_m — микротвердость обработанной поверхности, кг/мм²;

H_m — микротвердость исходного металла, кг/мм².

На фиг. 1 показано влияние режимов резания переднего угла и износа инструмента на изменение твердости поверхностного слоя при обработке жаропрочной стали ЭИ787. Из графиков видно, что твердость поверхностного слоя выше твердости исходного материала примерно на 20—40%. Особое влияние на повышение твердости поверхности оказывает износ режущего инструмента, который приводит к значительному увеличению сил резания.

Влияние элементов режима резания, геометрии и износа резцов на глубину проникновения наклепанного слоя при обработке стали ЭИ787 показано на фиг. 2. Из приведенных графиков видно, что при токарной обработке стали ЭИ787 толщина наклепанного слоя колеблется от 0,1 до 0,38 мм и является незначительной величиной. При этом с увеличением скорости резания и переднего угла толщина наклепанного слоя уменьшается, а увеличение подачи и износа резца приводит к значительному увеличению толщины наклепанного слоя.



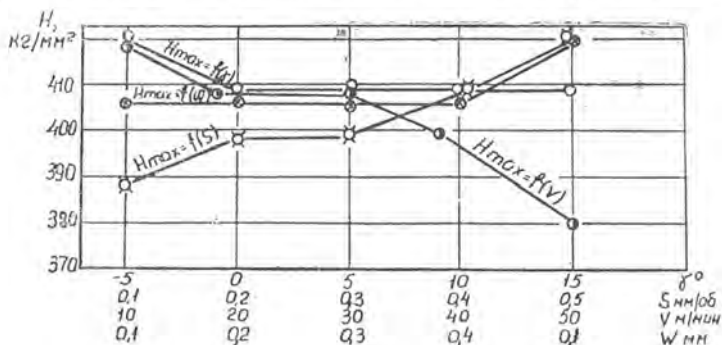
Фиг. 2. Влияние режима резания, износа инструмента и переднего угла на толщину наклепанного слоя при точении стали ЭИ787.

Решающим фактором, способствующим увеличению глубины и степени наклепа с увеличением износа инструмента является увеличение радиальной составляющей сил резания. Уменьшение толщины наклепанного слоя с увеличением переднего угла можно объяснить уменьшением сил резания.

Полученный в наших опытах характер влияния скорости резания на толщину и интенсивность наклепа можно объяснить значительным увеличением температуры в поверхност-

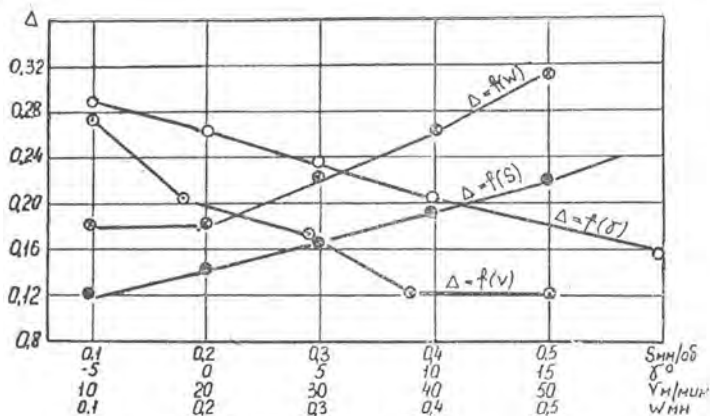
ных слоях, которая приводит к разупрочнению материала и частичному снятию наклепа.

Исследование наклепа при обработке титанового сплава ВТЗ-1 проводилось в зависимости от тех же параметров, что и



Фиг. 3. Влияние режима резания, износа инструмента и переднего угла на изменение твердости поверхностного слоя при точении титанового сплава ВТЗ-1.

для стали ЭИ787 и, примерно, в том же диапазоне их изменения. На фиг. 3 и 4 показано влияние режимов резания, геометрии и износа резцов на толщину и степень наклепанного слоя при токарной обработке титанового сплава ВТЗ-1.



Фиг. 4. Влияние режима резания, износа инструмента и переднего угла на толщину наклепанного слоя при точении сплава ВТЗ-1.

Из графиков видно, что при обработке титанового сплава в диапазоне указанных режимов резания и износа инструмента толщина наклепанного слоя колеблется от 0,12 до 0,28 мм, а интенсивность наклепа изменяется в пределах от 7 до 18%. Увеличение подачи и износа инструмента приводит к увеличению толщины и степени наклона, а увеличение скорости и переднего угла к их уменьшению.

При обработке титанового сплава ВТЗ-1 наибольшая твердость наклепанного слоя металла находится примерно на глубине $50 \div 100$ мк. При этом глубина залегания наиболее упрочненных слоев металла увеличивается с увеличением износа инструмента, подачи и с уменьшением переднего угла.

Полученный характер влияния элементов режима резания, геометрии и износа инструмента показывает, что при обработке титанового сплава ВТЗ-1 и жаропрочной стали ЭИ787 на толщину и степень наклепа оказывает влияние силовой фактор. Некоторое уменьшение интенсивности наклепа верхних слоев при обработке сплава ВТЗ-1 можно объяснить действием высоких температур в этих слоях, которые образуются в результате низкой теплопроводности титановых сплавов [1].

Из полученных результатов по исследованию наклепа видно, что интенсивность наклепа при работе на указанных режимах резания колеблется в пределах:

$$N = 17 \div 40\% \text{ для стали ЭИ787;}$$

$$N = 7 \div 18\% \text{ для титанового сплава ВТЗ-1.}$$

Глубина наклепанного слоя Δ колеблется в пределах:

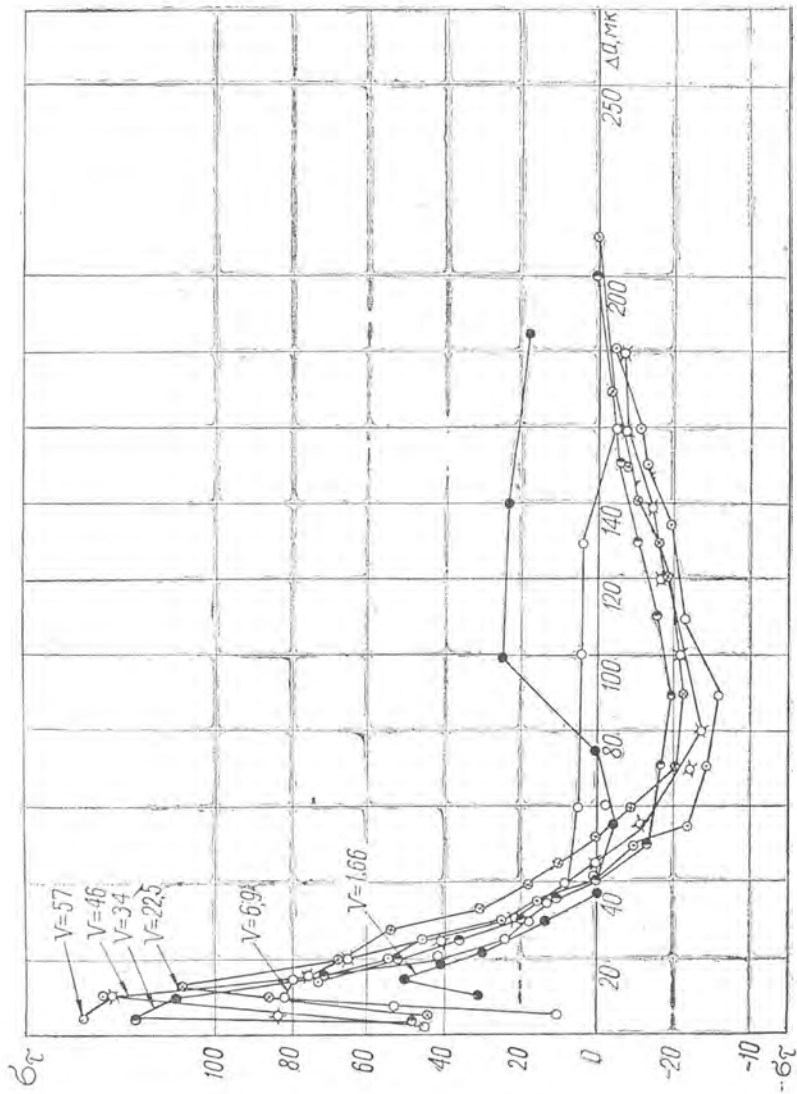
$$\Delta = (0,5 \div 0,8) \text{ а для ЭИ787;}$$

$$\Delta = (0,4 \div 0,6) \text{ а для ВТЗ-1,}$$

где a — толщина среза.

Остаточные напряжения определялись после токарной обработки титановых сплавов ВТЗ-1, ВТ14 и жаропрочной стали ЭИ787. Величина и характер остаточных напряжений исследовались в зависимости от элементов режима резания, геометрии и износа резца. В опытах применялись резцы с оптимальной геометрией и оптимальной маркой твердого сплава, значение которых приведено выше. Остаточные напряжения определялись по методу академика Н. Н. Давиденкова [2].

Деформация колец в процессе электрополирования измерялась на приспособлении, спроектированном Б. А. Кравченко и Б. П. Светличным [3].



фиг. 5. Влияние скорости резания на остаточные напряжения при обработке стали ЭИ787.

Результаты проведенных опытов показали, что при обработке жаропрочной стали ЭИ787 в верхних слоях обработанной поверхности наблюдаются растягивающие напряжения, которые далее переходят в сжимающие. Максимальное значение растягивающих напряжений в зависимости от условий обработки изменяются примерно от 50 до 120 кг/мм², а глубина их проникновения составляет 40—60 мк. Величина сжимающих напряжений не превышает 25 кг/мм².

На фиг. 5 показаны кривые изменения остаточных напряжений по глубине их залегания при работе на различных скоростях. Из фигуры видно, что увеличение скорости резания от $V=1,6$ м/мин до $V=57$ м/мин приводит к увеличению максимальных касательных напряжений от 50 до 120 кг/мм².

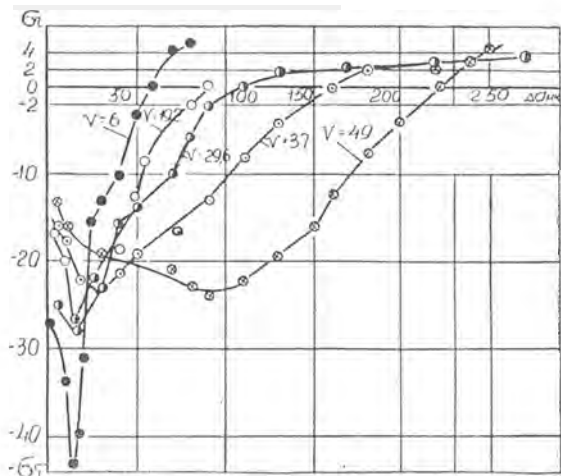
Исследование влияния глубины и подачи на величину и характер остаточных напряжений позволяет прийти к выводу, что увеличение глубины резания от 0,5 до 2 мм и подачи 0,1 до 0,4 мм/об приводит к увеличению максимальных растягивающих напряжений соответственно от 87 до 109 и от 79 до 109 кг/мм².

Уменьшение переднего угла приводит к уменьшению величины растягивающих напряжений и к увеличению глубины их проникновения. Применение у резцов с положительными передними углами $\gamma=10^\circ$ фаски на передней грани с $\gamma=-5^\circ$ приводит к уменьшению максимальных растягивающих напряжений.

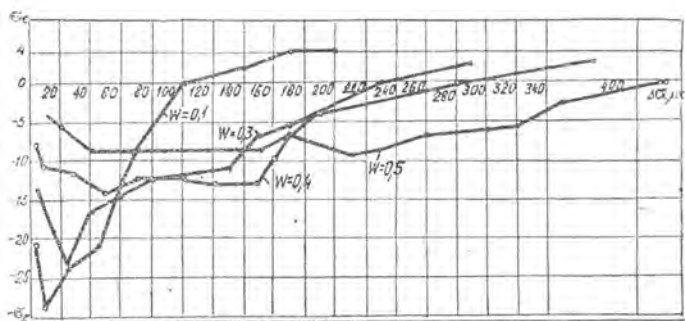
При токарной обработке титановых сплавов ВТ3-1 и ВТ14 в верхних слоях наблюдаются напряжения сжатия, максимальная величина которых достигает 20÷27 кг/мм². Далее сжимающие напряжения переходят в растягивающие. Таким образом, при обработке титановых сплавов ВТ3-1 и ВТ14 получен противоположный характер распределения остаточных напряжений по отношению к стали ЭИ787.

На фиг. 6 показано влияние скорости резания на величину и характер остаточных напряжений при обработке титанового сплава ВТ3-1. Из графиков видно, что увеличение скорости резания от $V=6$ м/мин до $V=49$ м/мин приводит к уменьшению наибольших сжимающих напряжений от 43 до 20 кг/мм².

На фиг. 7 показано влияние износа инструмента на остаточные напряжения при обработке титанового сплава ВТ14. Из фигуры видно, что с возрастанием износа по задней грани от 0,1 до 0,5 мм остаточные напряжения уменьшаются



Фиг. 6. Влияние скорости резания на остаточные напряжения при обработке сплава ВТ3-1.



Фиг. 7. Влияние износа инструмента на остаточные напряжения при обработке титанового сплава ВТ14.

примерно в 4 раза, а глубина их проникновения значительно увеличивается и доходит до 400 мк.

Из полученных данных по исследованию остаточных напряжений следует, что при токарной обработке жаропрочной стали ЭИ787 в верхних слоях возникают растягивающие напряжения, а при обработке титановых сплавов ВТ3-1 и ВТ14 — сжимающие. Так как величина и характер остаточных напряжений прежде всего зависит от температуры и сил

резания, сделана попытка установить связь между температурой в зоне резания и величиной максимальных касательных напряжений, а также, используя температурный фактор, объяснить появление в верхних слоях при обработке стали ЭИ787 растягивающих напряжений, а при обработке титановых сплавов — сжимающих. На основании температурных исследований были установлены следующие зависимости:

$$\Theta = 415 v^{0,28} S^{0,24} t^{0,07} \text{ для ЭИ787.} \quad (1)$$

$$\Theta = 265 v^{0,38} S^{0,17} t^{0,07} \text{ для ВТЗ-1.} \quad (2)$$

Сопоставление результатов температурных исследований и исследования остаточных напряжений показывает, что увеличение параметров, способствующих повышению температуры резания приводит к увеличению максимальных растягивающих напряжений и уменьшению сжимающих. Так как остаточные напряжения являются следствием неравномерной пластической деформации, влияние температурного фактора скажется в том случае, если температурные напряжения, возникающие в поверхностных слоях изделия, будут больше или равны пределу текучести данного материала.

Для определения таких напряжений была использована формула проф. А. А. Маталына [4]:

$$\sigma_T = 0,5 (t_2 - t_1) E \alpha, \quad (3)$$

где σ_T — напряжения, возникающие в детали в результате неравномерного нагрева;

E — модуль упругости исследуемого материала;

α — коэффициент линейного расширения;

t_1 — исходная температура;

t_2 — температура нагрева.

Из формулы (3) видно, что величина температурных напряжений зависит не только от температуры нагрева, но и от величины модуля упругости и коэффициента линейного расширения обрабатываемого материала.

Следовательно, в материалах с малыми значениями коэффициента линейного расширения и модуля упругости термопластические деформации могут возникать при более высоких температурах, чем в материалах с большими значениями E и α .

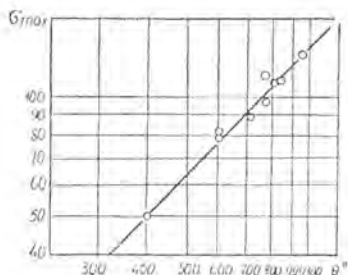
Подсчет температурных напряжений показал, что в наших опытах при обработке титановых сплавов температурные напряжения были всегда меньше предела текучести сплавов

BT3-1 и BT14. Аналогичные расчеты, проведенные для жаропрочной стали ЭИ787, показывают, что при температуре порядка 400°C температурные напряжения равны пределу текучести. При обработке стали ЭИ787 температуры в зоне резания колебались от 500 до 850°.

Из сказанного следует, что при обработке жаропрочной стали ЭИ787 решающим в образовании остаточных напряжений является температурный фактор. При обработке титановых сплавов BT3-1 и BT14 температурные напряжения значительно меньше, чем у стали ЭИ787, потому что модуль упругости меньше, примерно, в 2 раза, а коэффициент линейного напряжения в 1,5 раза, чем у жаропрочной стали ЭИ787. Следовательно, растягивающие остаточные напряжения при обработке титановых сплавов могут образовываться при более высоких температурах в зоне резания (выше 1000—1200°C).

При токарной обработке титановых сплавов доминирующим в образовании остаточных напряжений является силовой фактор, который наводит напряжения сжатия.

Так как при обработке жаропрочной стали ЭИ787 доминирующим является температурный фактор, в работе сделана попытка увязать величину максимальных растягивающих напряжений с температурой в зоне резания. Зависимость между температурой резания и максимальными остаточными напряжениями представлена на фиг. 8 и может быть записана в следующем виде:



Фиг. 8. Зависимость между температурой резания и остаточными напряжениями растяжения. Материал ЭИ787.

$$\sigma_{\tau \max} = C_{\sigma} \theta^{1,0}, \quad (4)$$

где $\sigma_{\tau \max}$ — тангенциальные максимальные остаточные напряжения;

C_{σ} — постоянный коэффициент;

θ — температура в зоне резания.

Коэффициент C_{σ} найден как среднее арифметическое из всех проведенных опытов, $C_{\sigma} = 0,132$. Следовательно, $\sigma_{\tau \max} = 0,132 \theta^{1,0}$. Зависимость (4) можно преобразовать, если подставить вместо температуры ее значение из уравнения (1):

$$\sigma_{\tau \max} = 55 v^{0,28} S^{0,24} l^{0,07}.$$

Проведенные подсчеты максимальных растягивающих напряжений для различных режимов резания показали, что отклонения от экспериментальных данных не превышают 10—13%. Эта зависимость может быть использована в производственных условиях при выборе режимов резания для жаропрочной стали ЭИ787 с учетом величины остаточных напряжений.

В работе проведено исследование влияния остаточных напряжений на усталостную прочность для титанового сплава ВТЗ-1.

Обработка образцов производилась резцами с оптимальной геометрией на скоростях резания $V=7$ м/мин и $V=30$ м/мин (остальные режимы резания были: $t=0,5$ и $S=0,2$), а также резцами с передним углом $\gamma=15^\circ$ на режиме резания $t=0,5$; $S=0,22$ и $V=30$ м/мин.

Результаты исследования влияния остаточных напряжений на предел усталостной прочности приведены в таблице. 1.

Таблица 1

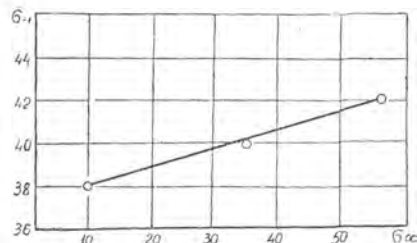
Результаты исследования усталостной прочности

Серия	$\sigma_{\tau, \max}$, кг/мм ²	$\sigma_{\text{ос}, \max}$, кг/мм ²	$\sigma_{-1 N=10^7}$, кг/мм ²
I	—43	—57	42
II	—23	—35	40
III	—	—10	38

Зависимость между осевыми остаточными напряжениями сжатия и пределом усталостной прочности представлена на графике фиг. 9 в виде прямой, уравнение которой может быть выражено:

$$\sigma_{-1} = \sigma_{-1 \text{ иск.}} + \alpha \sigma_{\text{ос}, \max} \quad (5)$$

где σ_{-1} — искомый предел усталостной прочности;



Фиг. 9. Влияние остаточных напряжений на предел усталостной прочности. Материал ВТЗ-1.

- $\sigma_{-1 \text{ исх.}}$ — исходный предел усталостной прочности (при отсутствии остаточных напряжений);
- $\sigma_{\text{ос. max}}$ — максимальная величина осевых остаточных напряжений;
- α — коэффициент, показывающий степень влияния остаточных напряжений на предел усталостной прочности.

Из таблицы 1 и формулы (5) видно, что при токарной обработке титанового сплава ВТЗ-1 увеличение сжимающих напряжений приводит к повышению усталостной прочности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. П. Урывский, Б. С. Коротин. Исследование обрабатываемости титанового сплава ВТЗ-1 и жаропрочной стали ЭИ787. Труды всесоюзной межвузовской конференции, Куйбышев, 1962.
 2. Н. Н. Давиденков. Измерение остаточных напряжений в трубах, ЖТФ, выпуск 1, 1931.
 3. Б. А. Кравченко. Силы, остаточные напряжения и трение при резании металлов. Куйбышевское книжное издательство, 1962.
 4. А. А. Маталин. Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин. Машгиз, 1956.
-