

УДК 539.319:539.373:621.219

Б.А.Кравченко, А.Е.Вишняков

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ПРОТЯГИВАНИИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

В настоящей работе изложены результаты исследования протягивания жаропрочных двухфазных $\alpha + \beta$ титановых сплавов ВТ8, ВТ9, ОТ4. Учитывая, что качество поверхностного слоя существенным образом влияет на сопротивляемость усталостному разрушению, особое внимание уделялось исследованию характеристик качества поверхностного слоя.

Эксперименты велись на горизонтально-протяжном станке модели 7А510, модернизированном для работы со скоростью резания до 30 м/мин. На специально созданной установке [1] осуществлялись измерения вертикальной P_y и горизонтальной P_z составляющих силы резания, а также температуры резания по методу естественной термопары, с записью указанных параметров с помощью осциллографа. В качестве режущего инструмента применялись специально изготовленные двухзубые плоские протяжки из быстрорежущей стали Р18 (HRC = 64 - 66; $\gamma = 12^\circ$; $\alpha = 4^\circ$; $S_z(\alpha) = 0,03$ мм) и оснащенные пластинками твердого сплава ВК8 [2] ($\gamma = 8^\circ$; $\alpha = 4^\circ$; $S_z(\alpha) = 0,03$ мм). Образцы каждого из указанных сплавов изготавливались из одного прутка и перед окончательной обработкой подвергались двойному отжигу по режимам ВИАМ, а предназначенные для исследования остаточных напряжений в окончательном готовом виде дополнительно подвергались вакуумному отжигу (нагрев до 600°C , выдержка 3 часа, вакуум 10^{-4} мм рт. столба). Фактические

толщины срезов измерялись специальным контрольным приспособлением, оснащенным индикаторными часами с ценой деления 2 мкм. В качестве СОЖ использовался сульфозрезол [3].

Исследование остаточных напряжений в поверхностном слое производилось по методу академика Н.Н.Давиденкова с использованием аппаратуры, разработанной в Куйбышевском авиационном институте [4]. Для травления применялся раствор состава [5]: плавиковая кислота - 2%, азотная кислота $\geq 25\%$, остальное - дистиллированная вода; температура 20°C.

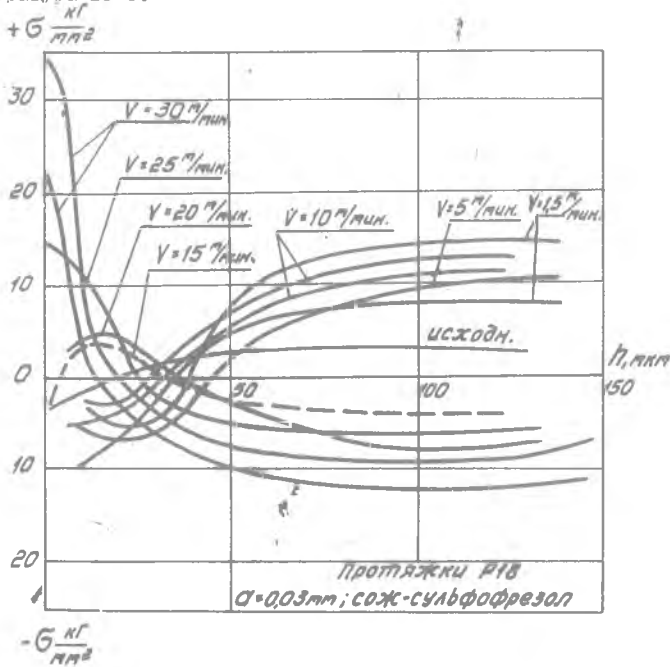


Рис. 1. Влияние скорости протягивания на остаточные напряжения в поверхностном слое. (протяжки из ст. P18, сплав ВТ8, $a = 0,03$ мм).

Результаты исследования в виде эпюр остаточных напряжений в зависимости от скорости резания в диапазоне $V = 1,5-30$ м/мин ($a = 0,03$ мм, протяжки P18) представлены на рис. 1. Как видно из графиков, при скоростях $V = 1,5-15$ м/мин эпюры остаточных на-

пряжений на поверхности располагаются в области сжатия с глубиной проникновения до 45 мкм. При скоростях $V \geq 15+20$ м/мин на поверхности появляются растягивающие напряжения и тем большие, чем выше скорость резания.

Формирование остаточных напряжений в поверхностном слое при механической обработке, как известно, определяется тремя основными факторами: температурным и силовым полями и структурными (фазовыми) изменениями.

Под воздействием температуры резания поверхностный слой детали нагревается и стремится увеличиться в объеме (удлиниться). Но этому препятствуют нижележащие слои ненагретого металла. Как следствие, в нагретом поверхностном слое детали возникают напряжения сжатия, величина которых с достаточной степенью точности может быть определена по формуле [6].

$$\sigma_{\theta} = K \cdot \frac{\theta \cdot E \cdot \alpha}{1 - \mu} \text{ кг/мм}^2, \quad (1)$$

где θ - температура поверхностного слоя, $^{\circ}\text{C}$; E - модуль упругости, кг/мм^2 ; α - коэффициент линейного расширения, $1/^{\circ}\text{C}$; μ - коэффициент Пуассона, для титановых сплавов $\mu = 0,35$; K - коэффициент, учитывающий связь нагретого поверхностного слоя с ненагретым подповерхностным слоем; по данным проф. А.А.Маталина $K = 0,5$.

В тех случаях, когда температурные напряжения сжатия σ_{θ} превысят предел текучести материала, в поверхностном слое возникнут пластические деформации. В результате, при охлаждении поверхностного слоя его площадь стремится к уменьшению, однако этому препятствуют нижележащие слои. Поэтому в поверхностном слое формируются растягивающие остаточные напряжения. Необходимая температура поверхностного слоя, при которой будут наблюдаться описанные явления может быть оценена, исходя из следующего. В таблице I приведены значения θ , E , α , $\sigma_{0,2}$ для сплава ВТ8 с учетом фактических температур нагрева, а также ориентировочные значения напряжения сжатия σ_{θ} , подсчитанные по формуле (1).

Сопоставляя значения $\sigma_{0,2}$ и σ_{θ} при одинаковых температурах, замечаем, что термопластические деформации возможны лишь при $\theta \geq 650^{\circ}\text{C}$, так как в этом случае $\sigma_{\theta} > \sigma_{0,2}$. В то же время, возникающая при протягивании сплава ВТ8 температура при максимальной

Таблица I

θ °С	E , кг/мм ²	$\alpha \cdot 10^6$ 1/°С	$\sigma_{0,2}$ кг/мм ²	σ_{θ} кг/мм ²
100	$1,15 \cdot 10^4$	8,45	95	8
200	$1,10 \cdot 10^4$	8,6	80	15
300	$1,05 \cdot 10^4$	8,75	73	21,5
400	$1,00 \cdot 10^4$	8,9	65	28
500	$0,90 \cdot 10^4$	9,05	57	31,5
550	$0,85 \cdot 10^4$	9,10	53	32,7
600	$0,80 \cdot 10^4$	9,2	40	34
650	$0,78 \cdot 10^4$	9,25	30	36
700	$0,70 \cdot 10^4$	9,35	15	40

скорости $V = 30$ м/мин ($a = 0,03$ мм) не превышает 550°С. Следовательно, появление в поверхностном слое растягивающих остаточных напряжений для диапазона $V \geq 15-20$ м/мин и $a = 0,03$ мм (рис. I) не связано с термопластическими деформациями.

Исследование фазовых (структурных) превращений в поверхностном слое, выполненное до и после протягивания образцов с помощью рентгенографического метода на установке УРС 5 ОИМ по методике к.т.н. М.И.Ермоловой [7], показало, что в пределах всего исследованного диапазона скоростей протягивания ($1,5+30$ м/мин) наблюдается одинаковое снижение процентного содержания β -фазы: в среднем от 10-12% до протягивания до 5-6% после протягивания.

В связи с таким характером изменения β -фазы возможно некоторое смещение всех эпюр остаточных напряжений в сторону растягивающих напряжений, так как распад β -фазы и переход ее в α -фазу характеризуется увеличением плотности от $\gamma_{\beta} = 4,35-4,47$ г/см³ до $\gamma_{\alpha} = 4,506-4,54$ г/см³ [8]. Следовательно, и этот фактор не является определяющим и не объясняет изменение знака остаточных напряжений при увеличении скорости.

Известно, что титановые сплавы при определенных условиях (повышенные температуры, наличие химически чистых поверхностей и т.д.) способны поглощать из атмосферы газы и, в первую очередь, водород. Исследование насыщения водородом поверхностного слоя образцов из сплава ВТ8, выполненное с помощью фотоэлектрического метода на спектро-

графе ИСП-5I с фотоумножителем ЭЗУ-22, показало, что при работе протяжками из быстрорежущей стали P18 ($\alpha = 0,03$ мм) с ростом скорости от 3 м/мин до 30 м/мин насыщение тонкого слоя поверхности водородом увеличивается с 0,006% до 0,010-0,012%, оставаясь практически неизменным (около 0,004-0,005%) на глубине $h \approx 0,03-0,05$ мм. При работе протяжками, оснащенными пластинками твердого сплава ВК8, при скорости протягивания 30 м/мин изменение толщины среза от 0,01 мм до 0,1 мм вызывает изменение содержания водорода в тонком поверхностном слое от 0,006% до 0,009-0,010%. Содержание водорода на глубине $h \approx 0,03-0,05$ мм так же, как и для быстрорежущих протяжек, практически не изменяется, оставаясь в пределах 0,005-0,006%. Являясь β - стабилизатором, водород способствует восстановлению β - фазы в противовес ее распаду под воздействием пластических деформаций. Анализ этих данных показывает, что наблюдаемые изменения в эпюрах остаточных напряжений не могут быть связаны с процессом насыщения водородом.

Приведенные данные дают основание утверждать, что при протягивании титановых сплавов изменение остаточных напряжений в зависимости от режимов резания (для исследованных пределов) связано, очевидно, с действием силового поля. На рис. 2 приводятся микрофотографии корней стружек, полученных при $U = 1,5$ м/мин и $U = 30$ м/мин. Из этих фотографий видно, что увеличение скорости резания изменяет процесс стружкообразования способствуя переходу от элементной стружки и сливной, что как показано в работах [5, 9], может существенно влиять на знак остаточных напряжений.

Под действием сил резания в подповерхностном слое детали возникает напряженное поле, которое можно условно разделить на две зоны с границей раздела в месте контакта режущей кромки с деталью (рис. 3а). В первой зоне, распространяющейся вперед и вглубь от режущей кромки, главное напряжение - радиальное сжимающее (рассматривается плоская задача), во второй зоне, распространяющейся вглубь и назад от режущей кромки - радиальное растягивающее [4, 9]. Частицы металла, попадая в первую зону, удлиняются в направлении, которое составляет некоторый угол с вектором скорости резания. По мере приближения к режущей кромке инструмента данный угол уменьшается, стремясь к нулю. В то же время одно из главных напряжений достигает максимума. При дальнейшем перемещении, частицы материала, ориентированные под углом, близким к нулю, попадают во вторую зону с иным характером напряженного поля.

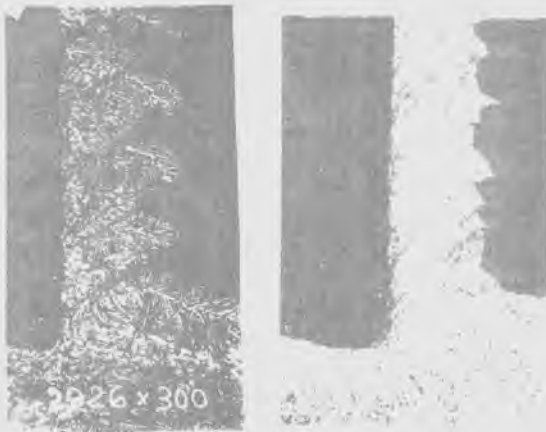


Рис. 2. Корни стружек. Протяжки из ст. P18, сплав ВТ8, $\delta = 0,06$ мм, увелич. 300X). а) - $V = 1,5$ м/мин; б) - $V = 30$ м/мин.

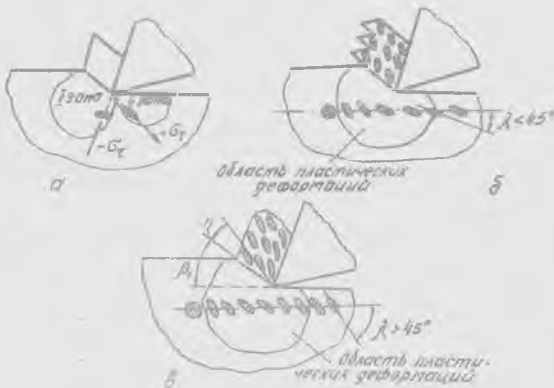


Рис. 3. Схема формирования остаточных напряжений.

В этой зоне частицы стремятся вытянуться в направлении к обработанной поверхности. Здесь интенсивность напряжений значительно ниже, чем в первой зоне. Поэтому даже с учетом эффекта Баушингера дополнительная деформация не может заметно изменить ориентацию деформированной частицы. Однако, в районе режущей кромки уже проявляется напряженное поле стружки, действие которого примерно совпадает с направлением радиального напряжения во второй зоне. В связи с этим интенсивность суммарного напряженного поля во второй зоне значительно возрастает.

В тех случаях, когда стружка имеет резко выраженное элементное строение (рис. 3б), отдельные зерна металла в элементе деформируются незначительно. Отделение элемента от основного металла происходит почти мгновенно с образованием опережающей трещины, которая является своеобразным барьером между напряженными полями подповерхностного слоя и стружки. Поэтому частицы металла в подповерхностном слое, определенные на первом этапе деформирования (в первой зоне), сохраняют эту ориентацию, переходя за режущую кромку во вторую зону. В связи с тем, что угол между осью максимального удлинения частиц и вектором скорости значительно меньше 45° , обработанная поверхность стремится к увеличению своей площади, чему препятствуют нижележащие недеформированные слои. В результате в поверхностном слое детали возникают сжимающие остаточные напряжения, а в нижележащих — растягивающие.

В тех случаях, когда образуется непрерывная (сливная) стружка (рис. 3в), между основным металлом и стружкой возникает взаимосвязь напряжений. Эта связь оказывает дополнительное влияние на частицы металла в подповерхностном слое, которое проявляется при переходе частиц из зоны перед режущей кромки (первая зона) под заднюю поверхность протяжки (вторая зона). Это влияние выражается в том, что частицы металла дополнительно деформируются (вытягиваются) в направлении вектора скорости схода стружки. Угол между направлением наибольшего удлинения частиц и вектором скорости становится больше 45° , в связи с чем поверхностный слой стремится к сокращению своей площади. В результате в поверхностном слое детали возникают растягивающие остаточные напряжения, а в нижележащих — сжимающие.

На основании изложенного можно сделать следующий основной вывод. Для наведения в поверхностном слое благоприятных остаточных напряжений при протягивании титановых сплавов типа ВТ8, ВТ9, ОТ4 быстрорежущими протяжками (Р18) следует работать со скоростями резания, не превышающими 15-20 м/мин.

Приемлемость указанных скоростей резания подтверждается результатами стойкостных исследований, а также исследованиями содержания водорода в поверхностном слое.

Литература

1. Вишняков А.Е., Шведов Ю.Г., Шмелев А.Н. Установка для исследования процесса резания при протягивании. Труды КуАИ, вып. 33. 1968.
2. Пронкин Н.Ф. Протягивание протяжками из твердых сплавов. М., "Машиностроение", 1966.
3. Бобров В.Ф. О роли смазывающие-охлаждающих жидкостей при резании титана "Вестник машиностроения", 1961, № 5.
4. Кравченко Б.А. Силы, остаточные напряжения и трение при резании металлов, Куйбышевское книжное издательство, 1962.
5. Кравченко Б.А., Митряев К.Ф. Обработка и выносливость высокопрочных материалов. Куйбышевское книжное издательство, 1968.
6. Маталин А.А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин. Машгиз, 1956.
7. Ермолова М.И. Рентгенографическое определение фазы в сплавах на основе титана. "Заводская лаборатория", 1965, § 5, XXXI.
8. Еременко В.Н. Титан и его сплавы. Киев, 1960.
9. Кравченко Б.А. и др. Повышение выносливости и надежности деталей машин и механизмов. Куйбышев, 1966.