

3. Майтаков А.Л. Плазменно-механическое строгание труднообрабатываемых сталей: Автореферат дис. на соискание уч.степени канд. техн.наук. - Л., 1981, 15с.
4. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение. - М.,Металлургия, 1970, 230с.
5. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. - М.:Машиностроение, 1971, 424с.
6. Шатерин М.А., Медко В.С., Некоторые факторы повышения производительности процесса резания с плазменным подогревом. - В кн.: Прогрессивные методы обработки резанием. Материалы семинара, 3-4 февр. - Л.: ЛДНТП, 1981, с. 6-11.

УДК 621.9.011:539.319

А.И.Промитов, В.И.Замашников

ОСТАТОЧНОЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ,
ФОРМИРУЮЩЕГОСЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЗАНИЕМ

Остаточные напряжения в поверхностном слое деталей, обработанных резанием, являлись предметом значительного числа исследований. Однако многие представления о формировании остаточных напряжений, влиянии на них условий обработки, роли отдельных факторов в их образовании продолжают оставаться неполными или противоречивыми [1]. Одной из причин такого положения, по нашему мнению, является недостаточное полное исследование самих остаточных напряжений.

В общем случае остаточное напряженное состояние поверхностного слоя для поверхностей малой кривизны близко к плоскому, поэтому оно должно описываться двумя главными остаточными напряжениями σ_1^0 и σ_2^0 , лежащими в плоскости, касательной к обработанной поверхности, и углом, определяющим их ориентацию в принятой системе координат. Поскольку ориентация главных осей заранее не известна, необходимо знать две нормальные взаимно перпендикулярных компоненты и одну касательную или третью нормальную компоненту, измеренную под углом, отличным от 90° по отношению к предыдущим двум. Если принять в качестве осей координат направления формирующих движений, что и делается в большинстве случаев, то остаточное напряженное состояние определится компонентами σ_z^0 , σ_x^0 , τ_{zx}^0 (допускаем, что ось Z направлена по вектору скорости резания, а ось X - по вектору подачи).

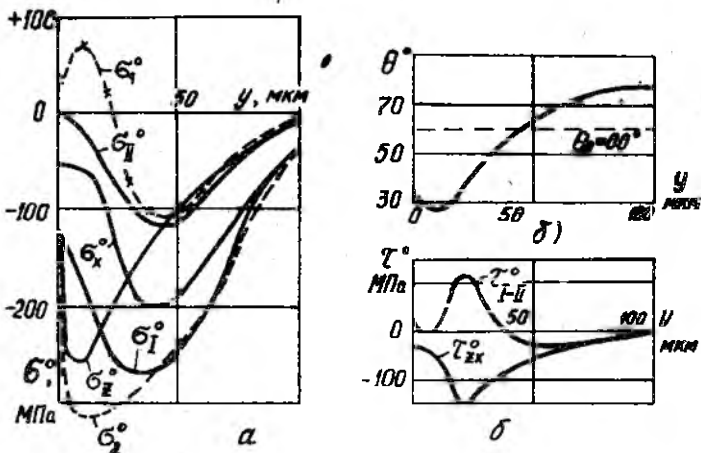
Из имеющихся в настоящее время работ большинство посвящено изучению остаточного напряжения σ_z^o , менее исследовано остаточное напряжение σ_x^o , касательное остаточное напряжение τ_{zx}^o изучено очень слабо, а нормальные остаточные напряжения в осях, не совпадающих с направлениями формообразующих движений, насколько нам известно, вообще не изучались.

Эти предпосылки послужили основанием для выполнения исследований, результаты которых излагаются ниже.

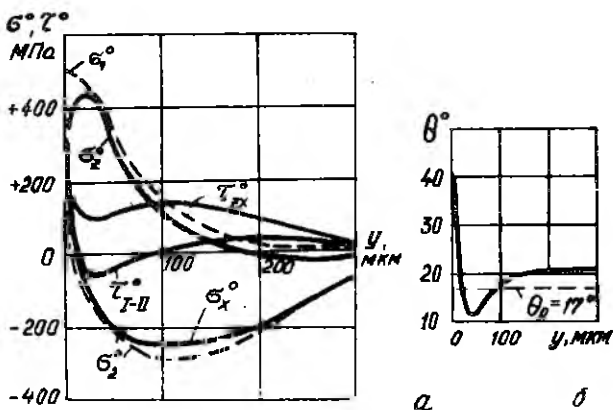
Для экспериментального определения остаточных напряжений были проведены опыты по точению втулок из стали I2X18H10T и строганию пластин из титанового сплава ОТЧ-1. Размеры образцов-втулок: длина 80 мм, внутренний диаметр 45 мм, наружный диаметр 51 мм. После обработки из втулок вырезали кольца и полоски для последующего определения компонент σ_z^o , σ_x^o , σ_{zx}^o . Образцы из сплава ОТЧ-1 представляли собой диски толщиной 3 мм и диаметром 105 мм, которые обрабатывали с одной стороны. После обработки и контроля деформации по методике, изложенной в работе [2], из дисков вырезали полоски по направлениям формообразующих движений для последующего определения остаточных напряжений σ_x^o и σ_y^o , а также по направлениям главных прогибов образца для последующего определения остаточных напряжений σ_x^o и σ_y^o в этих направлениях.

Базовые режимы резания при точении стали I2X18H10T были следующими: $v = 30$ м/мин; $s = 0,21$ мм/об; $t = 1$ мм, в отдельных сериях опытов скорость резания и подачу варьировали в пределах: $v = 5+180$ м/мин; $s = 0,11 + 0,3$ мм/об. Базовые режимы резания при строгании сплава ОТЧ-1: $v = 9$ м/мин; $s = 0,3$ мм/дв.ход; $t = 1$ мм с изменением скорости резания в отдельных сериях опытов в пределах $v = 5 + 15$ м/мин. Геометрические параметры резцов для обоих исследованных материалов изменялись в широких пределах: $\chi = -10^\circ \div +10^\circ$; $\lambda = -10 \div +20$; $\psi = 15^\circ \div 90^\circ$; $\psi_1 = 5^\circ \div 15^\circ$; $r = 0 + 2$ мм при базовой геометрии: $\chi = +10^\circ$; $\lambda = 0$; $\psi = 45^\circ$; $\psi_1 = 15^\circ$; $\alpha = \alpha_1 = 10^\circ$; $r = 0,5$ мм; $\lambda = 0^\circ$.

Кольца и полоски, вырезанные из образцов, исследовали на установке В.А.Кравченко с последующим расчетом на ЭВМ по формулам И.А.Биргера и С.И.Иванова [3]. Таким образом из опытов по точению стали I2X18H10T были получены две нормальных компоненты σ_z^o и σ_x^o и касательная τ_{zx}^o , в случае строгания сплава ОТЧ-1 — четыре нормальных компоненты, σ_z^o , σ_x^o , σ_y^o и σ_{yz}^o . На основе этой информации (рис. 1, а, 2, а) с помощью кругов Мора затем опре-



Р и с. 1. Характеристики остаточного напряженного состояния, создающегося при строгании титанового сплава ОТЧ-I:
 $v = 9$ м/мин; $S = 0,3$ мм/дв.ход.; $t = 1$ мм; $\delta = 10^0$; $\lambda = 0$; $\psi = 45^0$; $\psi_1 = 15^0$; $\gamma = 0$; $\alpha = \alpha_1 = 10^0$



Р и с. 2. Характеристики остаточного напряженного состояния, создающегося при точении стали 12Х18Н10Т: $v = 30$ м/мин;
 $S = 0,21$ мм/об; $t = 1$ мм; $\delta = 10^0$; $\lambda = 0$; $\psi = 90^0$; $\psi_1 = 15^0$; $\gamma = 0$; $\alpha = \alpha_1 = 10^0$

деляли все характеристики остаточного напряженного состояния. Знаки касательных остаточных напряжений принимали с учетом того, что система координат XOZ является левой.

Переходя к обсуждению результатов, обратимся вначале к рис. 1, на котором представлены результаты, полученные при исследовании образца из титанового сплава ОТЧ-1. Рис. 1,б характеризует изменение ориентации главных осей (угла θ между главным остаточным напряжением σ_2^0 и осью Z) по глубине поверхностного слоя. Как видно, главные остаточные напряжения не сохраняют постоянную ориентацию по глубине поверхностного слоя: угол θ минимален на глубине около 10 мкм и значительно увеличивается при ее росте.

На этом же графике показан угол $\theta_p = 60^\circ$, определяющий ориентацию главных прогибов образца и направление действия остаточных напряжений σ_{II}^0 и σ_I^0 . Можно предположить, что направление, задаваемое углом θ_p , является средним, интегральным главным направлением остаточных напряжений в поверхностном слое. С целью проверки этого предложения были найдены касательные остаточные напряжения τ_{I-II}^0 . Как видно из рис. 1,в, эпюра касательных остаточных напряжений τ_{I-II}^0 самоуравновешена в пределах своей активной части, что отвечает отсутствию в этих направлениях остаточной деформации закручивания.

Отсюда следует, что направления I и II являются направлениями действия минимальных касательных остаточных напряжений из всех возможных для данного напряженного состояния. Направления I и II также характеризуются тем, что площади активной части эпюр нормальных остаточных напряжений в этих направлениях достигают экстремальных значений, вследствие чего главные оси остаточных деформаций образца (главные прогибы) располагаются именно в этих направлениях.

Изменение ориентации главных остаточных напряжений с удалением от поверхности в образцах из стали 12Х18Н10Т показано на рис. 2,б. Как и на рис. 1,б, кривая $\theta^\circ = f(y)$ имеет экстремальный вид. Отличие лишь в том, что в рассматриваемом случае угол θ с приближением к поверхности резко увеличивается.

На образцах из стали 12Х18Н10Т ориентацию главных осей остаточных деформаций (угол θ_p) экспериментально не определяли, однако, исходя из представления о направлениях I и II как о средних, интегральных главных направлениях, произвели расчет этого угла по формуле
$$\operatorname{tg} 2\theta_p = \frac{2\omega_z^* x}{\omega_x^* - \omega_x^*},$$

где ω_z^* , ω_x^* , ω_{zx}^* - площади активной части эпюр соответствующих остаточных напряжений (рис.2,а), которые также являются интегральными характеристиками.

Значение угла θ_p представлено на рис. 2,б, а на рис. 2,а показана эпюра касательных остаточных напряжений τ_{I-II}^* полученная для направлений, определяемых углом θ_p . Как видим, эта эпюра также, как и на рис. 1,в, является самоуравновешенной в пределах активной части. Таким образом, несмотря на различные пути определения θ_p (по депланационной кривой - рис. 1,б или расчетом - рис. 2,б) результаты получаются аналогичными. Это может служить подтверждением справедливости изложенных выше соображений о сущности и свойствах остаточных напряжений, измеряемых в направлениях главных деформаций.

Исследование остаточных напряжений в указанных направлениях (назовем их интегральными главными осями) имеет несомненное значение. Их необходимо знать, например, при изучении остаточных деформаций, возникающих при обработке маложестких деталей. Интегральные главные оси остаточных напряжений в поверхностном слое определяют положение главных осей реактивной части эпюр остаточных напряжений.

Обращаясь к эпюрам главных остаточных напряжений, представленных пунктирными кривыми на рис. 1,а, 2,а, отметим, что для титанового сплава значения главных остаточных напряжений σ_1^* и σ_2^* значительно отличаются не только от остаточных напряжений σ_2^* и σ_x^* , измеренных в направлениях формообразующих движений, но и от остаточных напряжений, измеренных в направлениях I и II (σ_I^* , σ_{II}^*). Связано это со значительным изменением ориентации главных осей по глубине поверхностного слоя. Для образца из стали 12Х18Н10Т эти различия менее существенны как в связи с малым отклонением осей I и II от направлений формообразующих движений ($\theta_p = 17^\circ$), так и в связи с малыми в основном отклонениями главных осей от направлений I и II, лежащими в пределах $\pm 10^\circ$. Лишь в поверхностном слое, толщиной 10 ± 20 мкм, где это отклонение значительно ($\theta = 52^\circ$ при $y = 0$), расхождения в значениях остаточных напряжений очень существенны. На поверхности σ_x^* и σ_x^* равны соответственно 300 МПа и 400 МПа, а соответствующие главные остаточные напряжения σ_1^* и σ_2^* равны 560 МПа и 140 МПа.

Выводы

1. Остаточное напряженное состояние, создаваемое обработкой резанием, характеризуется изменением ориентации главных осей остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя.

2. В связи с этой особенностью при исследовании остаточного напряженного состояния целесообразно наряду с главными осями остаточных напряжений, имеющими свое направление в каждом горизонте, рассматривать и интегральные главные оси остаточных напряжений поверхностного слоя (оси I и II), характеризующиеся тем, что в этих направлениях площади эпюр активной части нормальных остаточных напряжений достигают экстремальных значений, а эпюры касательных остаточных напряжений самоуравновешены в пределах активной части.

Л и т е р а т у р а

1. Технологические остаточные напряжения. Под ред. д-ра техн. наук проф. А.В.Подзая. М.: Машиностроение, 1973, 216с.
2. Промптов А.И., Замащиков Ю.И. Остаточные напряжения и деформации при обработке маложестких деталей резанием. - Вестник машиностроения, 1975, № 4, с. 42-45.
3. Промптов А.И., Замащиков Ю.И. Структурно-единые формулы для расчета компонент тензора остаточных напряжений. - В кн.: Повышение эксплуатационных свойств деталей машин технологическими методами. Иркутск, 1980, с. 43-46.