

Матричная запись дает возможность более глубоко анализировать данные, полученные опытным путем, например, исследовать влияние формы распределения остаточных напряжений по глубине на предел выносливости материала.

Применение планирования эксперимента для получения коэффициентов уравнений регрессии помогает оценить достоверность зависимостей выведенных с помощью опытных данных.

### Л и т е р а т у р а

1. К о н о н о в В.К. Расчет температурного поля от движущегося полосового источника через максимальную температуру на поверхности. В сб.: "Исследование обрабатываемости жаропрочных и титановых сплавов". Межвузовский сборник. Вып. 1, Куйбышевский авиационный институт, 1973.
2. К о н о н о в В.К. К методике определения связи обобщенных остаточных напряжений с безразмерными параметрами режима шлифования. В сб.: "Исследование обрабатываемости жаропрочных и титановых сплавов". Межвузовский сборник. Вып. 2, Куйбышевский авиационный институт, 1974. с. 88-92.
3. С е д о в Л.А. Методы подобия и размерности в механике. М., Физматгиз, 1957.

А.Н.Овсеенко

### ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ МАЛОЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Технологический процесс изготовления деталей машин сопровождается, как правило, изменением их напряженного состояния. Так, при механической обработке с поверхности заготовки вместе с припуском удаляется часть эпюры остаточных напряжений, имеющихся в заготовке до обработки. Кроме того, сам процесс обработки сопровождается образованием новых остаточных напряжений, которые накладываются на ранее имевшиеся в заготовке. В результате суммарного воздействия удаляемых и вносимых остаточных напряжений деталь деформируется, принимая новое равновесное состояние. Остаточные деформации могут достигать значительных величин и составлять большую часть суммарной погрешности обработки маложестких деталей.

Особенно остро проблема борьбы с остаточными деформациями (короблением) стоит при изготовлении крупных турбинных лопаток. Максимальным деформациям (до 4 мм на лопатках длиной 760 мм) подвергаются верхние наиболее тонкие сечения пера лопатки. Основным видом деформации являются деформации косоугольного изгиба. Раскрутка торцевого сечения не превышает  $0,6^\circ$ . Построение всего технологического процесса обработки лопаток, назначение режимов резания и геометрии инструмента необходимо производить с учетом коробления лопаток.

С целью установления рациональных режимов и условий обработки, вызывающих минимальное коробление, в ЦНИИТМАШ были проведены исследования основных операций технологического процесса обработки лопаток. В данной статье излагаются результаты исследования цилиндрического фрезерования. Материалы по исследованию остаточных напряжений и коробления деталей при абразивной обработке изложены в работе [2].

В связи со сложностью формы рабочей части турбинных лопаток и невозможностью проведения большого количества опытов на натуральных лопатках влияние технологических факторов на остаточные напряжения и деформации исследовалось на плоских прямоугольных образцах  $120 \times 20 \times 3,5$  мм. Эксперименты проводились в специальном приспособлении тисочного типа, в котором образцы ложились на жесткое основание и не имели возможности прогибаться в процессе обработки. Величина деформации оценивалась стрелой прогиба в середине образца на базе 110 мм. Положительными (+) считались деформации в направлении, противоположном обрабатываемой поверхности (обрабатываемая поверхность вогнутая).

Основные исследования проводились на лопаточных материалах: стали 2Х13, высокопрочном  $\alpha + \beta$  титановом сплаве ВТ3-1,  $\alpha$ -сплавах ВТ5 и ТС5. Исследовалась также чувствительность к остаточным деформациям сталей 1Х13, Х17Н2, 15Х1МФ, Ст.45.

Остаточные напряжения определялись по методу Н.Н.Давиденкова путем травления поверхностного слоя образцов в специальной установке [3].

Газовый анализ травленной поверхности титановых сплавов показал, что сам процесс травления сопровождается насыщением поверхности газами ( $N_2$ ,  $N_2$ ,  $O_2$ ) и искажает начальную энергию остаточных напряжений. В меньшей степени это проявляется на однофазных  $\alpha$ -сплавах ВТ5 и ТС5 и существенно - на двухфазном сплаве ВТ3-1. Выбор состава раствора для травления производился с учетом производительности и возможно меньшего газонасыщения [4]. Погрешность от газонасыщения при опреде-

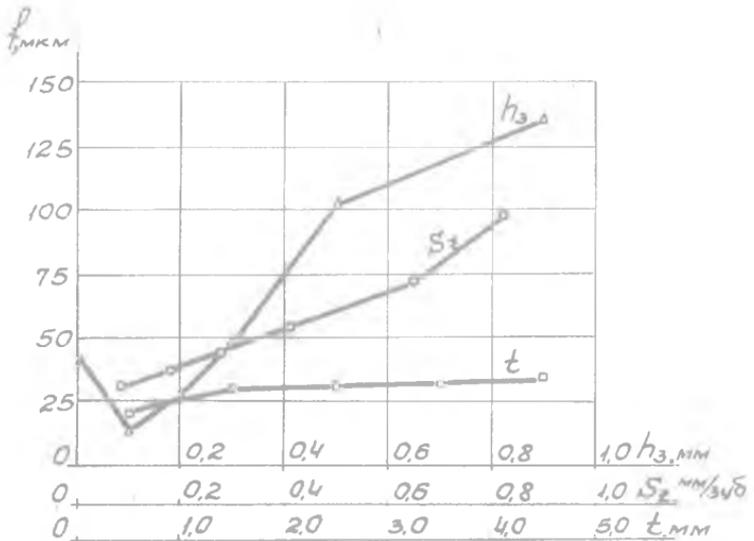


Рис. 1. Влияние подачи ( $S_2$ ), износа фрезы ( $h_3$ ) и глубины резания ( $t$ ) на остаточные деформации образцов из стали 2X13

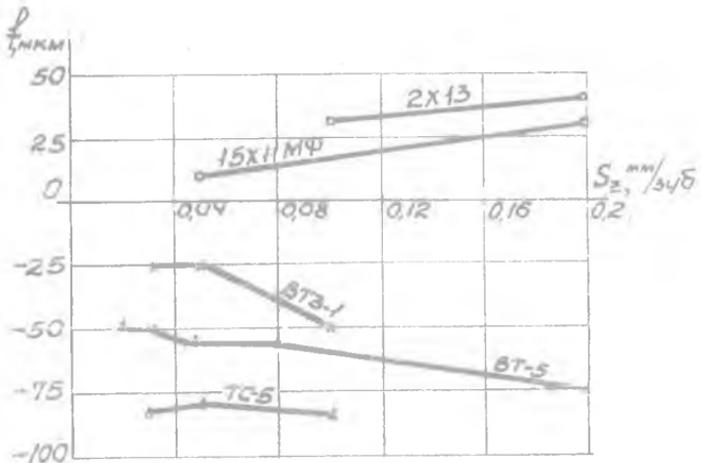


Рис. 2. Влияние подачи на остаточные деформации титановых сплавов и лопаточных сталей

лении остаточных напряжений учитывалась с помощью компенсационного образца (метод двух кривых деформации).

Опыты по фрезерованию проводились на горизонтально-фрезерном станке 6Н83 цилиндрической фрезой со спиральным зубом.

Условия обработки стальных образцов: материал фрезы - P18,  $D = 43$  мм,  $z = 5$ ,  $\alpha = \gamma = 10^\circ$ ,  $\omega = 40^\circ$ ,  $\rho \leq 0,03$  мм; основной режим резания -  $t = 3,5$  мм,  $S_z = 0,26$  мм/зуб,  $V = 31$  м/мин; фрезерование - встречное; охлаждение - эмульсией.

Условия обработки титановых образцов: фреза с пластинками ВК8;  $D = 40$  мм;  $z = 6$ ;  $\gamma = 0^\circ$ ;  $\alpha = 15^\circ$ ;  $\omega = 40^\circ$ ;  $\rho \leq 0,003$  мм; основной режим резания -  $t = 3$  мм;  $S_z = 0,05$  мм/зуб;  $V = 30$  м/мин; фрезерование - встречное без СОЖ.

Исследования показали, что при фрезеровании в поверхностном слое титановых сплавов в основном формируются сжимающие остаточные напряжения, в то время как на сталях - растягивающие напряжения. Соответственно и остаточные деформации титановых и стальных образцов имеют противоположное направление.

Из составляющих режимов резания наибольшее влияние на деформации образцов оказывает подача (рис. 1,2). Увеличение подачи с  $0,083 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}$  до  $0,83$  мм/зуб приводит к повышению деформаций образцов из стали 2Х13 в 3,5 раза (с  $0,03$  мм до  $0,105$  мм).

На сплаве ВТ5 увеличение подачи с  $0,02$  мм/зуб до  $0,2$  мм/зуб сопровождается увеличением остаточных деформаций с  $0,05$  мм до  $0,075$  мм. Как на титановых сплавах, так и на образцах из нержавеющей стали уровень остаточных напряжений растет с увеличением подачи (рис. 3). Для выяснения роли подачи в формировании остаточных напряжений необходимо проанализировать зависимость толщины среза от подачи, особенно на участке непосредственного контакта зуба фрезы с обработанной поверхностью. Формула  $a = S_z \sin \psi$ , которой часто пользуются для определения переменной по дуге контакта толщины среза, в данном случае неприменима, так как существенно занижает значение  $a$  (по  $a_{\text{max}}$  - в 2 раза).

При встречном фрезеровании теоретическая толщина среза  $a$  изменяется от 0 до максимума и с достаточной точностью (участок трохойды заменен дугой окружности) может быть подсчитана по формуле

$$a = R + S_z \sin \psi - \sqrt{R^2 - S_z^2 \cos^2 \psi} = S_z \sin \psi + \frac{S_z^2}{2R}, \quad (I)$$

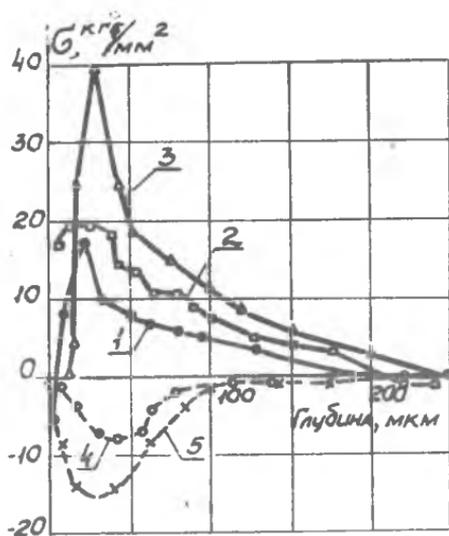


Рис. 3. Остаточные напряжения в поверхностном слое образцов, обработанных с разными подачами: а - для стали 2Х13; 1 -  $S_z = 0,083 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}$ ; 2 -  $S_z = 0,41 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}$ ; 3 -  $S_z = 0,65 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}$ ; б - для ВТ5; 4 -  $S_z = 0,05 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}$ ; 5 -  $S_z = 0,2 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}$

деформируемому полупространству, то переход от пластического обтекания металлом округленной вершины к резанию наступает при условии [1]

$$\frac{a}{\rho} \geq \left( \frac{\pi}{5,6} - \frac{1,3\tau}{q_z} \right)^2, \quad (3)$$

где  $\tau$  - прочность связи контактируемых поверхностей на срез;  $q_z$  - фактическое давление.

Из соотношения (3) следует, что при идеальной смазке ( $\tau = 0$ ) образование стружки начинается при относительном внедрении  $\frac{a}{\rho} = 0,31$ . В условиях сухого трения пластическое обтекание переходит в резание при  $\frac{a}{\rho} = 0,1 - 0,2$ .

В табл. I представлены расчетные значения  $a_{\max}$  для различных подач  $S_z$  и диаметра фрезы 43 мм, а также кратчайшие расстояния до точек 1, 2, 3, 4, 5, рассчитанные по формуле

$$t_n = \sqrt{R^2 + n(n-1)S_z^2} - R, \quad (4)$$

где  $R$  - радиус фрезы;  $S_z$  - подача на зуб фрезы;  $\Psi$  - текущий угол.

Из (1) определяются максимальное ( $\sin \Psi = \frac{S_z}{2R}$ ) и среднее ( $\Psi = 0$ ) значения толщины среза на участке непосредственного образования поверхностного слоя.

$$a_{\max} = \frac{S_z^2}{R}, \quad (2)$$

$$a_{\text{ср}} = R - \sqrt{R^2 - S_z^2} = \frac{S_z^2}{2R}$$

Изменение радиуса фрезы и подачи оказывает существенное влияние на условия пластической деформации металла в зоне резания и особенно в зоне образования поверхностного слоя. Если вершину зуба рассматривать как жесткий цилиндр радиусом  $\rho$ , который скользит по пластически

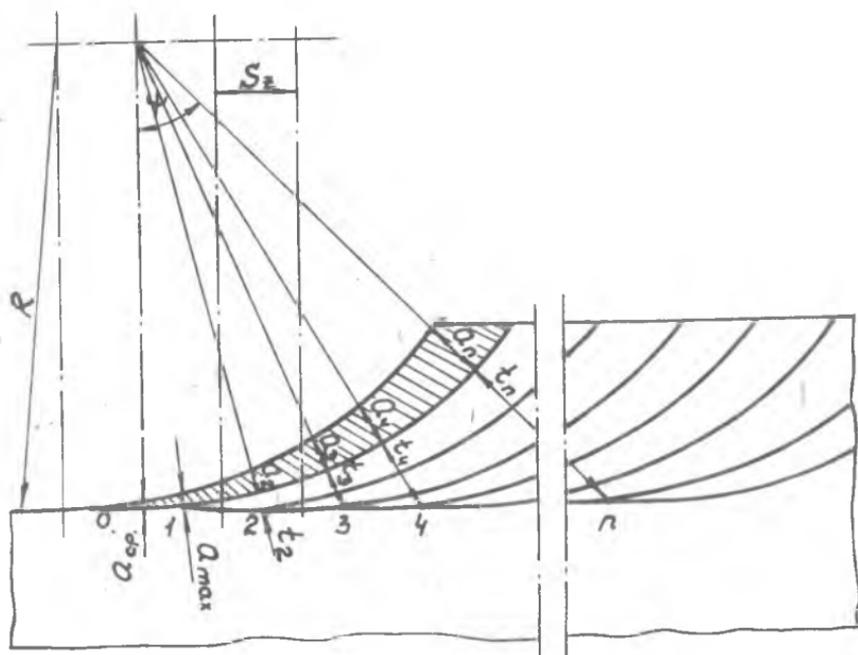


Рис. 4. Схема к расчету толщины среза

где  $n$  - номер точки, до которой определяется расстояние.

Т а б л и ц а I

$S_z$ , мм/зуб	$a_{\max}$ мм	$t_2$ , мм	$t_3$ , мм	$t_4$ , мм	$t_5$ , мм	$\gamma_{\phi}$ , град	$t_n$ , мм	$n$
0,02	0,02	0,02	0,06	0,1	0,2	-90	80,0	93
0,08	0,30	0,3	0,9	2,0	3,0	-83	100,0	26
0,2	2,0	2,0	6,0	11,0	19,0	-67,5	100,0	10
0,4	7,5	7,5	22,0	45,0	74,0	-47	120	6
0,8	30,0	30	89,0	178,0	296,0	0	150	3

Там же представлены номера точек ( $n$ ), в которых возможно начало протекания пластических деформаций, а значит, и появление первых остаточных напряжений. Число  $n$  определялось из (4) по заданной (для примера) глубине проникновения пластической деформации ( $t_n$ ). Из данных табл. I следует, что формирование поверхностного слоя и остаточных напряжений представляет собой многостадийный (многоцикловый) процесс. Окончательное образование поверхностного слоя происходит после многократного (в нашем примере от 3 до 93 раз) воздействия напряженного поля на одни и те же участки поверхности. Таким образом, при формировании конечной эпюры остаточных напряжений должен иметь место эффект накопления металлом поверхностного слоя остаточных деформаций и соответствующих им остаточных напряжений. Подобный эффект возможен и при воздействии теплового поля. Обращает на себя внимание очень малая толщина среза на участке образования поверхностного слоя. Даже при больших подачах (до 0,4 мм/зуб) она значительно меньше, чем радиус округления режущей кромки фрезы ( $\rho = 30$  мкм).

В этих условиях передний угол практически не оказывает влияния на процесс образования поверхностного слоя, так как резание или упруго-пластическое оттеснение металла в поверхностный слой осуществляется округленной режущей кромкой, и фактические передние углы ( $\gamma_{\text{ф}}$ ) принимают большие отрицательные значения (табл. I,  $\sin \gamma_{\text{ф}} = 1 - \frac{a_{\text{max}}}{\rho}$ ).

В связи с наличием радиуса округления  $\rho$  по мере врезания зуба фрезы в металл упругое оттеснение металла перейдет в пластическое деформирование и затем - в резание.

Соотношение участков обработанной поверхности, окончательно сформированных путем пластической деформации тонких слоев и снятием стружки, зависит от величины подачи, диаметра фрезы и радиуса округления режущей кромки. На него должны оказывать влияние все факторы, определяющие протекание адгезионных процессов в месте контакта обрабатываемого материала с округленной режущей кромкой (вид обрабатываемого и инструментального материала, состояние трущихся поверхностей, поверхностные пленки, смазка, температура и т.п.).

Из соотношения (3) следует, что при хорошей смазке образование стружки возможно, когда толщина среза достигает 9,3 мкм (3-6 мкм - в условиях сухого трения). Сравнивая эти толщины с величиной  $a_{\text{max}}$

(табл. I), можно видеть, что при работе с подачами до 0,4 мм/зуб вся обработанная поверхность может быть окончательно сформирована не резанием, а путем упруго-пластического оттеснения металла в поверхностный слой. Это может служить причиной понижения уровня остаточных напряжений в тончайших верхних слоях, которое наблюдается на большинстве экспериментальных эюр.

По сравнению с подачей изменение скорости резания оказывает меньшее влияние на остаточные деформации образцов (рис. 5). Однако,

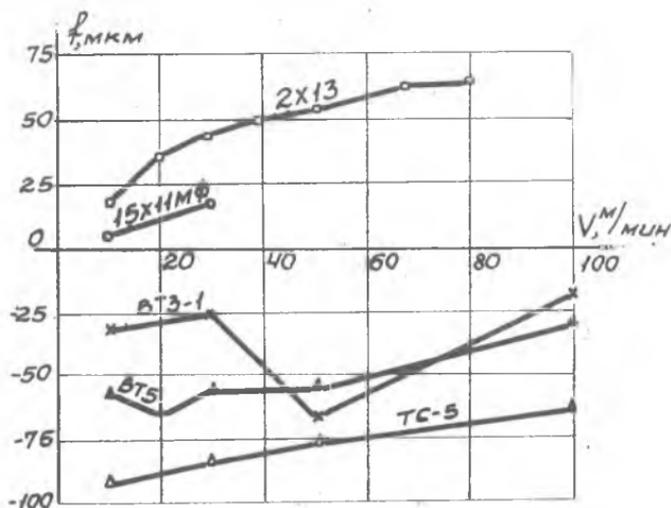


Рис. 5. Влияние скорости резания на остаточные деформации образцов

если на стали 2X13 наблюдается некоторое увеличение остаточных деформаций с ростом скорости резания, то на титановых сплавах наблюдается противоположная картина – остаточные деформации образцов имеют тенденцию к уменьшению. С увеличением скорости резания растет величина растягивающих напряжений в тонком поверхностном слое образцов из стали 2X13 с 20 кг/мм<sup>2</sup> до 30 кг/мм<sup>2</sup>, но одновременно резко уменьшается глубина их залегания (с 0,2 мм до 0,05 мм), т.е. происходит локализация пластических деформаций в тонком слое. При фрезеровании титановых сплавов с увеличением скорости резания от 10 м/мин до 100 м/мин максимальные значения сжимающих остаточных напряжений уменьшаются и при  $V = 100$  м/мин в поверхностном слое

образуются остаточные напряжения растяжения. Такая закономерность объясняется усиливающимся влиянием термопластических деформаций с ростом скорости резания.

Опыты по попутному и встречному фрезерованию показали, что при попутном фрезеровании стали 2Х13 и I5XIIИФ деформации образцов более чем в 2 раза превышают деформации при встречном фрезеровании. Встречное же фрезерование титановых сплавов вызывало большие деформации, чем попутное. Наблюдается существенное различие и в уровне остаточных напряжений. Встречное фрезерование титановых сплавов формирует в поверхностном слое остаточные напряжения сжатия 20-30 кг/мм<sup>2</sup>. Попутное фрезерование вызывает остаточные напряжения того же знака, однако величина их в 2 раза меньше.

Сильно изменяются деформации образцов в зависимости от износа фрезы по задней грани. Так, с увеличением износа от 0,2 мм до 0,9 мм деформации образцов из 2Х13 увеличиваются в 3,5 раза в основном за счет увеличения глубины проникновения в поверхностный слой растягивающих остаточных напряжений (рис. 6), хотя происходит уменьшение уровня остаточных напряжений. Подобная картина наблюдается и при фрезеровании титановых сплавов. Уменьшение уровня остаточных напряжений можно объяснить повышением температуры при работе изношенной фрезой. Увеличение же глубины проникновения происходит за счет роста сил и напряженности самого процесса резания.

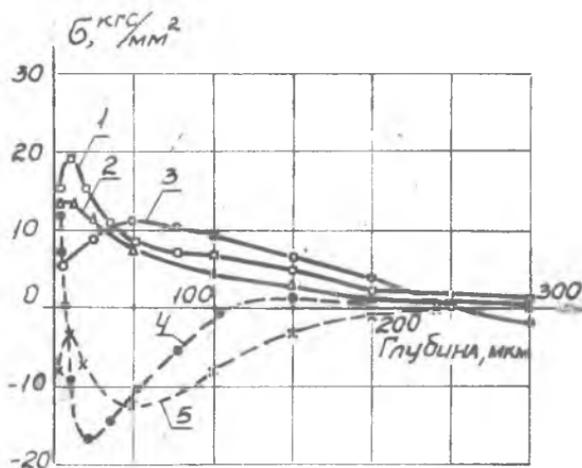


Рис.6. Влияние износа фрезы на остаточные напряжения в поверхностном слое:

- а — для стали 2Х13,
- 1 — острая фреза;
- 2 —  $h_3 = 0,2$  мм;
- 3 —  $h_3 = 0,5$  мм;
- б — для сплава ТС5;
- 4 — острая фреза;
- 5 —  $h_3 = 0,5$  мм

Сравнение остаточных деформаций титановых образцов после фрезерования фрезами Р18 и фрезами с пластинками твердого сплава ВК-8 показало, что остаточные деформации меньше при использовании сплава ВК-8. Твердый сплав ВК-8 менее склонен к адгезионному и диффузионному взаимодействию с титановыми сплавами, чем быстрорежущая сталь, что является основной причиной уменьшения уровня остаточных напряжений и деформаций.

Разные лопаточные стали показали разную чувствительность к деформациям при фрезеровании. Наименее чувствительной оказалась сталь Х17Н2, и наибольшие деформации получены на стали 2Х13. Сталь 15Х1МФ имела остаточные деформации в 1,5 раза меньше, чем 2Х13. Эти результаты можно объяснить тем, что при встречном фрезеровании длина участка скольжения до начала образования стружки увеличивается с повышением прочностных свойств обрабатываемого материала. Деформация титановых сплавов увеличивались с повышением их предела текучести и составляли для ВТ3-1 - 0,026 мм ( $\sigma_T = 66 \text{ кгс/мм}^2$ ), для ВТ-5 - 0,056 мм ( $\sigma_T = 73 \text{ кгс/мм}^2$ ); для ТС-5 - 0,080 мм ( $\sigma_T = 85 \text{ кгс/мм}^2$ ).

На титановых сплавах наблюдалась обратная зависимость в связи с образованием в поверхностном слое при фрезеровании остаточных напряжений сжатия.

#### Л и т е р а т у р а

1. Крагельский И.В. Трение и износ. М., "Машиностроение", 1968, с. 129.
2. Овсеенко А.Н. Остаточные напряжения и коробление при абразивной обработке деталей из нержавеющей сталей и титановых сплавов. Тезисы докладов Всесоюзной конференции "Теория и практика алмазной и абразивной обработки деталей приборов и машин", М., 1973, с. 152-157.
3. Овсеенко А.Н. Остаточные напряжения и деформации деталей при шлифовании и полировании. Сб. "Алмазно-абразивная обработка высокопрочных и труднообрабатываемых материалов". М., ЦНИИТМАШ, 1967, с. 169-183.
4. Розенфельд И.Д., Бабкин Ю.А., Алексеева Е.И. Травление высокопрочных титановых сплавов без наводораживания. "Защита металлов". 1970, № 4, т. 6.