

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ ЖАРОПРОЧНЫХ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ
Межвузовский сборник, вып. I, 1973 г.

УДК 621.9.011

И.И.Резников I, А.С.Черемисин

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ
И ОБРАБАТЫВАЕМОСТЬ ЖАРОПРОЧНЫХ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Обрабатываемость материала выявляется через деформации и напряжения в зоне резания; силы и температуры, возникающие в процессе резания; износ и стойкость инструмента; производительность обработки; качество обработанной поверхности.

Деформация в зоне резания. Исследование деформаций, возникающих в процессе резания, может быть осуществлено детальным и комплексным методами.

Детальное изучение деформаций осуществляется с помощью координатных сеток. При свободном резании, схема которого показана на рис. I, куб со сторонами l_0 , выделенный из обрабатываемого материала, в процессе деформирования превращается в наклонный параллелепипед со сторонами l_x , l_y и l_z в системе координат x, y, z . В этой системе ось z совпадает с направлением вектора скорости резания, а две другие оси ей перпендикулярны. Относительные линейные деформации (истинные) в направлении этих осей выражаются известными соотношениями

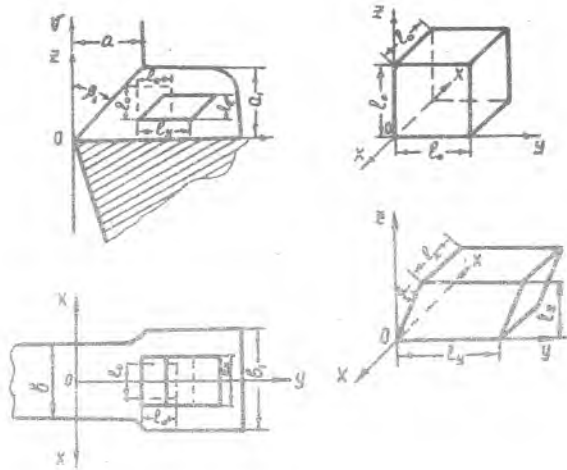


Рис. 1. Схема деформаций в процессе резания

$$\epsilon_z = \epsilon_n \frac{l_z}{l_0}; \quad \epsilon_y = \epsilon_n \frac{l_y}{l_0}; \quad \epsilon_x = \epsilon_n \frac{l_x}{l_0} \quad (1)$$

а угловые в плоскости zOy - величиной

$$\gamma_{zy} = \text{tg } \alpha_0 \quad (2)$$

Вследствие закона постоянства объема при пластической деформации имеют место следующие соотношения:

$$\epsilon_z + \epsilon_y + \epsilon_x = 0; \quad \epsilon_z = -(\epsilon_x + \epsilon_y)$$

Деформации характеризуются (по аналогии с упругим формоизменением) их величиной, именуемой интенсивностью деформаций. Эта величина является инвариантом, независимым от ориентации в пространстве рассматриваемой частицы. Для плоского деформированного состояния ($\epsilon_x = 0$) интенсивность деформаций рассчитывается по формуле

$$\epsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\epsilon_z^2 + \epsilon_y \cdot \epsilon_z + \epsilon_y^2 + \frac{1}{4} q_{zy}^2} \quad (3)$$

В современной теории пластического течения вещества большое значение придается не только деформациям, но и скоростям их изменения во времени. Для плоского деформированного состояния эти скорости описываются зависимостями

$$\dot{\epsilon}_z = \frac{d\epsilon_z}{d\tau}; \quad \dot{\epsilon}_y = \frac{d\epsilon_y}{d\tau}; \quad \dot{q}_{zy} = \frac{dq_{zy}}{d\tau}; \quad \dot{\epsilon}_i = \frac{d\epsilon_i}{d\tau} \quad (4)$$

(размерность - I) сек или проценты (сек).

Введение величин $\dot{\epsilon}_z$, $\dot{\epsilon}_y$, \dot{q}_{zy} и $\dot{\epsilon}_i$ вызвано тем, что при значительном пластическом формоизменении главные оси напряженного состояния совпадают с главными осями скоростей деформации, а не с главными осями деформаций (как это имеет место при малых пластических формоизменениях) [1].

На кафедре "Резание, станки и инструменты" (РСИ) Куйбышевского авиационного института определение скоростей деформаций осуществляется при помощи скоростной киносъемки. По частоте кадров и искажениям координатной сетки построены графики (рис. 2) зависимостей

$$\epsilon_z, \epsilon_y, q_{zy}, \epsilon_i = f(\tau),$$

а по ним далее графически или аналитически (путем аппроксимации теми или иными уравнениями) найдены величины

$$\dot{\epsilon}_z, \dot{\epsilon}_y, \dot{q}_{zy}, \dot{\epsilon}_i = f(\tau).$$

Кривые такого типа показаны на рис. 3. На оси абсцисс обозначены номера кинокадров и соответствующее им время от начала отсчета (в сек). На оси ординат откладываются скорости деформаций. Из рисунка видно, что наибольшая скорость соответствует сдвиговым деформациям и наступает между 8-ым и 9-ым кадрами. Она равна примерно 32 I/сек или 3200 процен-

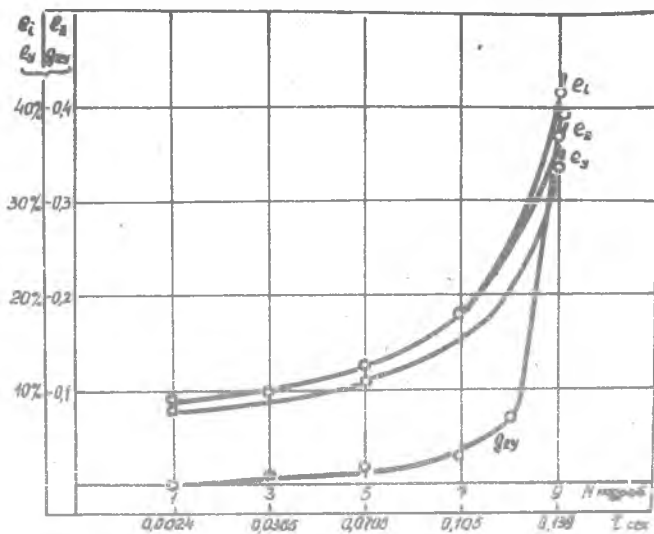


Рис. 2. График зависимости деформаций от времени. Обрабатываемый материал - титановый сплав ОТ4, $\sigma_B = 70 \text{ кг/мм}^2$; $b = 1,48 \text{ мм}$; $a = 0,5 \text{ мм}$; $V = 150 \text{ мм/мин} = 0,15 \text{ м/мин}$; $\gamma = 20^\circ$; $\beta_1 = 45^\circ$.

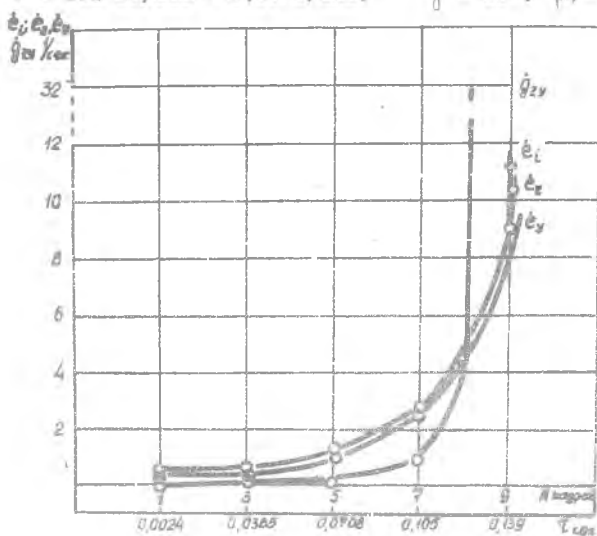


Рис. 3. График зависимости скорости деформаций от времени. Условия те же, что к рис. 2.

тов в сек. Графики, приведенные на рис. 3, относятся к малой скорости резания ($V = 0,15$ м/мин), полученной при строгании образцов на горизонтально-фрезерном станке. По имеющимся данным [2], скорость деформации изменяется примерно пропорционально скорости резания и в пределах $V = 20-100$ м/мин (при точении, например, нержавеющей стали 2Х13 с подачей $s = 0,305$ мм/об) составляет 2000-9000 Г/сек. Эти данные сопоставимы с приведенными на рис. 3.

Полученные графики "скорость деформации - время" составляют основу для расчета напряжений, возникающих в зоне резания, и их изменчивости во времени.

Детальное изучение деформаций, имеющее важное значение, связано с достаточно сложным экспериментом. Поэтому для оценки деформаций обрабатываемого материала в зоне резания используется также комплексный метод, базирующийся на определении величин поперечной и продольной усадки стружки. Нами предложена единая формула для расчета продольной усадки элементных и непрерывных стружек

$$K_e = K_a \cdot K_b \cdot \epsilon_o, \quad (5)$$

где $K_a = \frac{a_1}{a}$ - поперечная усадка; $K_b = \frac{b_1}{b}$ - уширение;
 $\epsilon_o = \frac{d_1 + d_2}{2a_1}$ - коэффициент сплошности стружки; a и b - соответственно толщина и ширина среза; b_1 - ширина стружки.

Размеры a_1 и a_2 видны из рис. 4.



Рис. 4. Элементарная стружка при обработке титанового сплава ВТЗ-1

для малопластичных материалов: титановых, цинкоалюминий-медных сплавов, силуминов и др.

Для непрерывной стружки $a_2 = a_1$ и $\epsilon_o = 1,0$. Для элементной $\epsilon_o < 1,0$.

Формула (5) может быть представлена в следующем виде:

$$K_e = \frac{0,5 \cdot \cos(\beta_1 - \gamma)}{\sin \beta_1} \cdot \frac{b_1}{b} \left(1 + \frac{a_2}{a_1}\right), \quad (6)$$

где β_1 - угол скалывания; γ - передний угол инструмента.

Величина K_e может быть либо больше единицы, либо меньше ее. Если $K_e < 1$, усадку условно называют "отрицательной". Значение $K_e < 1$ характерно

Проанализируем формулу (6), чтобы выяснить условие наступления "отрицательной" усадки. Предварительно примем для малопластичных материалов на основании опытных данных

$$\left(\frac{b_1}{b}\right)_{\text{ср}} = 1,05; \quad \left(\frac{a_2}{a_1}\right)_{\text{ср}} = 0,4.$$

Тогда получаем условие наступления "отрицательной" усадки в виде

$$\frac{\cos(\beta_1 - \gamma)}{\sin \beta_1} < 1,37,$$

откуда

$$\text{tg } \beta_1 > \frac{\cos \gamma}{1,37 - \sin \gamma} \quad (7)$$

Если для малопластичных материалов принять $\gamma = 0+10^\circ$, то из формулы (7) следует, что $\beta_1 > (36-40)^\circ$. Опыт показывает, что при обработке титановых сплавов имеют место углы скалывания, достигающие до $45-50^\circ$, что связано со сравнительно малыми коэффициентами внешнего трения этих сплавов в паре с металлами. Так, если по Н.Н.Зореву [3]

$$\beta_1 = \epsilon + \gamma - \rho,$$

где ρ - угол внешнего трения, $\epsilon = 57$, то указанным величинам γ и β_1 соответствуют углы $\rho < (21-27)^\circ$ и коэффициенты трения $\mu < 0,35+0,50$, что согласуется с опытными данными.

Таким образом, "отрицательная" усадка для титановых сплавов является вполне реальным фактором. Исследования показывают, что "отрицательная" усадка стружки неблагоприятно влияет на важнейшие показатели обрабатываемости, в том числе, на температуру резания и износ инструмента. Дело в том, что при $K_e < I$ скорость движения стружки по передней поверхности увеличивается, размеры контактной площадки между стружкой и инструментом уменьшаются, площадка контакта приближается к режущей кромке, удельные контактные давления возрастают.

Из приведенных выше рассуждений вытекает важное практическое заключение: при назначении режимов резания для титановых сплавов целесообразно ограничивать скорости, глубины резания и подачи условием $K_e > 1,0$. Отыскание области $K_e > 1$ может быть осуществлено на основании материалов исследований кафедры "РСИ" КуАИ.

Значительный теоретический и практический интерес представляет сопоставление по величине интенсивности деформаций — инвариантной характеристики, и деформаций, найденных комплексным методом в виде K_a или K_e . Поперечная деформация при этом является основной как для элементарных, так и непрерывных стружек. Для непрерывных стружек ($\epsilon_0 = 1$), как видно из формулы (5),

$$K_a = \frac{K_e}{K_6} = (0,91 - 0,95) K_e.$$

Поэтому лучше всего сравнивать интенсивность деформаций с поперечной деформацией. Однако для этого необходимо по величине K_a находить либо условные (δ_a), либо истинные (логарифмические) деформации ϵ_a :

$$\delta_a = \frac{a_1 - a}{a} = K_a - 1,$$

$$\epsilon_a = \ln \frac{a_1}{a} = \ln K_a.$$

Полученные таким путем величины логично сопоставлять с $\epsilon_{i \max}$, так как

$$\delta_a, \epsilon_a \text{ и } \epsilon_{i \max}.$$

относятся к моменту разрушения материала и образования элемента стружки. Сравнение приведено в табл. I.

Из таблицы видно, что за некоторыми исключениями, численные величины δ_a и ϵ_a имеют тот же порядок, что и величины $\epsilon_{i \max}$. Таким образом, величины поперечной усадки, в первом приближении, характеризуют максимальную интенсивность деформаций в зоне резания. Установить между усадкой и интенсивностью деформаций какие-либо определенные соотношения невозможно в связи с большим разбросом опытных данных и различной тенденцией их изменения: величины δ_a и ϵ_a уменьшаются с увеличением толщины среза, а $\epsilon_{i \max}$ возрастает. Увеличение переднего угла в том и другом случае ведет к уменьшению показателей деформации.

Таблица I

Сопоставление деформаций, найденных различными методами.
Обработываемый материал - титановый сплав OT4 ($Ti - Al - Mn$),
свободное резание $v = 1,5$ мм/мин. $V = 0,15$. Резец P18.

a мм	γ°	$\delta_a = \kappa_a - 1$	$\epsilon_a = \epsilon_n \kappa_a$	$\epsilon_{i, \max}$ (эксп.)
0,196	20°	0,44	0,36	0,27
0,29	"	0,40	0,33	0,33
0,475	"	0,37	0,31	0,35
0,51	"	0,31	0,27	0,42
0,65	"	0,15	0,13	0,44
0,415	8°	0,40	0,33	0,44
0,395	18°	0,37	0,31	0,36
0,395	32°	0,25	0,22	0,31

Напряжения в зоне резания. Переходим к рассмотрению напряжений, возникающих при резании материалов. Они тоже могут быть определены как для отдельных точек зоны резания, так и комплексно - на основании определения составляющих силы резания по трем осям координат P_x , P_y , P_z .

Связь между деформациями и напряжениями при современном состоянии науки о пластических деформациях еще не может быть установлена однозначно. Однако, в первом приближении, для этой цели можно использовать теорию пластического течения вещества, о которой упоминалось выше.

Рассмотрим теоретико-экспериментальный метод определения связи между напряжениями и деформациями, используя некоторые материалы исследований кафедры "РСИ" КуАИ.

Аналогично инвариантной характеристике деформированного состояния ϵ_i представим инвариантную характеристику напряженного состояния - интенсивность напряжений для плоского напряженного состояния - в виде выражения

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (8)$$

Примем далее, что разность компонентов напряжений по осям координат пропорциональна разности компонентов скорости деформации по этим осям, то есть

$$\frac{\sigma_z - \sigma_y}{\dot{\epsilon}_z - \dot{\epsilon}_y} = c = \frac{2\tau_{zy}}{\dot{\gamma}_{zy}}, \quad (9)$$

где c - коэффициент пропорциональности.

По условию несжимаемости (постоянства объема) сумма скоростей деформаций по осям координат равна 0, то есть

$$\dot{\epsilon}_z + \dot{\epsilon}_y = 0. \quad (10)$$

Обозначая для плоского напряженного состояния

$$p = \frac{\sigma_z + \sigma_y}{2}, \quad (11)$$

где p - так называемое гидростатическое давление, и подставляя (10) и (11) в (9), получаем

$$\begin{aligned} \sigma_z + p &= c \cdot \dot{\epsilon}_z \\ \sigma_y + p &= c \cdot \dot{\epsilon}_y. \end{aligned} \quad (12)$$

Коэффициент c , согласно Г.А. Смирнову-Аляеву, может быть рассчитан по выражению:

$$c = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_i}{\dot{\epsilon}_i}. \quad (13)$$

Он является переменной величиной, зависящей от обрабатываемого материала и интенсивности деформаций. Подставляя (13) в (12), приходим к расчетным уравнениям

$$\begin{aligned} \sigma_z + p &= \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_i}{\dot{\epsilon}_i} \cdot \dot{\epsilon}_z \\ \sigma_y + p &= \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_i}{\dot{\epsilon}_i} \cdot \dot{\epsilon}_y \\ \tau_{zy} &= \frac{1}{3} \cdot \frac{\sigma_i}{\dot{\epsilon}_i} \cdot \dot{\gamma}_{zy} \end{aligned} \quad (14)$$

Величину $\mu = \frac{1}{3} \frac{\sigma_i}{\epsilon_i}$ называют коэффициентом жесткости. Он зависит от механических свойств обрабатываемого металла и величин скоростей деформаций.

В уравнения (14) входят 8 неизвестных, из которых четыре $\dot{\epsilon}_z, \dot{\epsilon}_y, \dot{\epsilon}_i, q_{zy}$ - должны быть найдены экспериментальными путем. Для этой цели используется метод скоростной киносъемки процесса резания образцов с координатной сеткой. Недостатком метода является необходимость применять для скоростных кинокамер с числом кадров 5000-7000 кад/сек малые скорости резания. Однако, если принять скорости деформаций пропорциональными скоростям резания, то из структуры формул (11) можно сделать вывод о независимости напряжений от скорости резания. Этот результат связан с допущениями, лежащими в основе упомянутых выше приближенных формул.

Для нахождения компонентов напряжения по осям координат необходимо иметь зависимость "интенсивность напряжений - интенсивность деформаций" в виде функции

$$\sigma_i = \Phi(\epsilon_i).$$

Тогда при известных величинах ϵ_i известны также и σ_i , и уравнения (14) будут решаться однозначно.

Зависимость $\sigma_i = \Phi(\epsilon_i)$ находится на основании аппроксимации кривых деформационного упрочнения (в пластической зоне) при растяжении. Так, для титанового сплава OT4, $\sigma_b = 70 \text{ кг/мм}^2$, $\delta = 13\%$ при нормальной температуре

$$\sigma_i = 100 \epsilon_i^{0,084}$$

Используя графики, аналогичные приведенным на рис. 2 и 3, по уравнениям (14) находим величины напряжений σ_z, σ_y и τ_{zy} в функции от времени. Такие графики приведены на рис. 5 для условий рис. 2 и 3.

Из рис. 5 следует, что все напряжения резко возрастают между 8 и 9-м кадрами, когда намечается скалывание образовавшегося элемента, и достигают величин: $\sigma_{z \max} = 94 \text{ кг/мм}^2$, $\sigma_{y \max} = 58 \text{ кг/мм}^2$, $\tau_{zy \max} = 48 \text{ кг/мм}^2$, $\sigma_i \max = 93 \text{ кг/мм}^2$. Последняя величина хорошо соответствует истинному пределу прочности материала при разрыве с учетом упрочнения при резании.

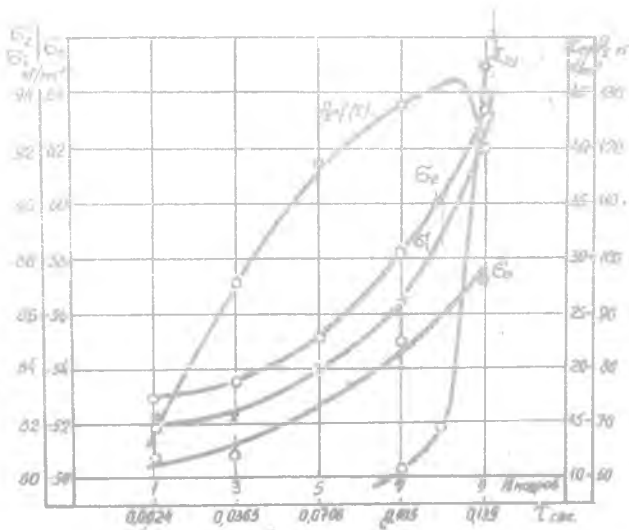


Рис. 5. Зависимость напряжений от времени, Условия те же, что к рис. 2.

$$\sigma_{\text{чпр}} = \sigma_{\text{в}} (1 + \delta) \cdot K_{\text{чпр}} = 96 \text{ кг/мм}^2.$$

Величина $\tau_{zy \text{ max}}$ близка к определяемой по формуле Лепслея, Грасси и Томсена [4].

$$\tau_{zy \text{ max}} = \frac{\sigma_{L \text{ max}}}{\sqrt{3}} = 0.58 \cdot 93 = 54 \text{ кг/мм}^2.$$

Изложенный метод позволяет находить значения компонентов напряжений и тем самым создает основу для решения ряда практических задач, возникающих при обработке.

Силы резания. Как уже отмечалось выше, исследование сил резания позволяет комплексно определять напряжения в зоне резания. Для сопоставления напряжений, полученных методом координатных сеток и комплексным, целесообразно одновременное и синхронное проведение обоих видов исследований. Аппаратура для этого разработана на кафедре "РСИ".

График $P_z = f(t)$, приведенный на рис. 5, соответствует условиям исследований на рис. 2. Максимальные сдвигающие напряжения могут быть определены по известной формуле

$$\tau_{xy \max} = \frac{P'_z}{a \cdot b} \cdot \frac{\sin \beta_1 \cdot \cos(\rho + \beta_1 - \gamma)}{\cos(\rho - \gamma)}, \quad (15)$$

где P'_z - часть главной составляющей силы резания, примененная к передней поверхности реза; ρ - угол трения между стружкой и передней поверхностью реза.

Принимая $\rho = 27^\circ$ и величину $P_{z \max} = 120 \text{ кг}$ (рис. 5) и полагая $P'_z = 0,75 P_{z \max}$, получаем

$$\tau_{xy \max} = \frac{0,75 \cdot 120}{0,5 \cdot 1,48} \cdot \frac{\sin 46^\circ \cdot \cos 52^\circ}{\cos 7^\circ} = 51 \text{ кг/мм}^2$$

Эта величина близка к найденной методом детального исследования напряжений.

Если определять удельное давление резания по отношению к силе P'_z , то в данных условиях получим

$$p' = \frac{P'_z}{b \cdot a} = \frac{0,75 \cdot 120}{0,5 \cdot 1,48} \approx 120 \text{ кг/мм}^2$$

где порядок величины p' согласуется с $\sigma_{i \max} = 93 \text{ кг/мм}^2$. Следовательно, подтверждается высказанное в свое время академиком В.Д.Кузнецовым мнение, что удельное давление резания является некоторым "условным напряжением в зоне резания".

Особый интерес представляет нахождение связи между интенсивностью напряжений и остаточными напряжениями сжатия, которые формируются главным образом под влиянием сил резания. Этой проблеме посвящены пока лишь единичные исследования. По данным А.С.Зыкина (КуАИ), отношение средней величины сжимающих остаточных напряжений при точении титанового сплава АТ-4 ($t = 2,0$; $S = 0,3$; $V = 10 \text{ м/мин}$; $\gamma = 8^\circ$) к средней по элементу интенсивности напряжений, найденной по методу координатных сеток, составляет

$$\frac{\sigma_{\text{ост. ср.}}}{\sigma_i \text{ ср.}} = 0,25.$$

По другим данным кафедры "РСИ", при торцовом фрезеровании титанового сплава ОТ4 средние остаточные напряжения сжатия составляют 20 кг/мм². По отношению к найденной при точении средней интенсивности напряжений на рис. 5 ($\sigma_i = 85 \text{ кг/мм}^2$) получаем

$$\frac{\sigma_{\text{ост. ср.}}}{\sigma_i \text{ ср.}} = \frac{20 - 25}{85} = 0,23 - 0,29.$$

Цель дальнейших исследований в этой области - нахождение остаточных напряжений без разрушения изделий.

Литература

1. Смирнов - Аляев Г.А. Механические основы пластической обработки металлов. "Машиностроение", Д., 1969.
2. Куфарев Г.Д., Гольдшмидт М.Г., Говорухин В.А. Процесс резания, как процесс пластической деформации. Труды Уральского юбилейной сессии. Курган, 1969.
3. Зорев Н.Н. Некоторые задачи науки о резании металлов и механика процесса резания. Сб. "Проблемы резания металлов". Труды Всесоюзной научно-технической конференции, ч. I. М., 1963.
4. Клушин М.И. Резание металлов. М., Машгиз, 1958.