

Описанная выше аппаратная модернизация позволяет, в свою очередь, использовать новые методы интерполяции траекторий обработки, поскольку классический (отрезками прямых) в десятки раз снижает реальную производительность станка.

Таким образом, предлагаемое аппаратно-программное обеспечение процесса ВСФ деталей летательных аппаратов, наряду с использованием разработанных новых технологических приемов применения инструмента и его оптимальных траекторий, позволило существенно повысить производительность при ВСФ, обеспечивая при этом высокое качество и точность обработанных поверхностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технологическое обеспечение аэродинамических обводов современного самолета. Иванов Ю.Л., Кабалдин Ю.Г., Кузьмин В.Ф. и др. -М.: Машиностроение-1, 2001. С. 284-351.
2. Фрезерная головка. Кузьмин В.Ф. А.с. 812446 СССР МКИ В 23 С 3/00. Заявка № 2769875. Заявл. 28.06.79. Бюл. № 10.
3. Фрезерная головка. Кузьмин В.Ф., Кузьмина Л.Н. А.с. 931326 СССР МКИ В 23 С 3/16. Заявка № 2730510. Заявл. 01.03.79. Бюл. № 20.
4. Способ обработки криволинейных поверхностей. Кузьмин В.Ф. А.с. 931328 СССР МКИ В 23 С 3/16. Заявка № 2817744. Заявл. 26.06.79. Бюл. № 20.
5. Способ обработки плоскостей. Кузьмин В.Ф. А.с. 1161278 СССР МКИ В 23 С 3/00. Заявка № 3684944/25-08. Заявл. 04.01.84. Оpubл. 15.06.85. Бюл. № 22.
6. Способ обработки сложных конических поверхностей. Кузьмин В.Ф. А.с. 1338221 СССР МКИ В 23 С 3/16. Заявка № 4020119. Заявл. 19.12.85.
7. Способ обработки сложных конических поверхностей. Кузьмин В.Ф. А.с. 1408634 СССР МКИ В 23 С 3/16. Заявка № 4129049. Заявл. 08.10.86
8. Способ обработки сложных поверхностей. Кузьмин В.Ф. А.с. 1439862 СССР МКИ В 23 С 3/16. Заявка № 4249288. Заявл. 01.04.87.
9. Способ обработки деталей с криволинейными поверхностями. Кузьмин В.Ф. и др. Патент 2169643 РФ МКИ С2 7 В 23 С 3/16. Заявка № 99121978/02. Бюл. № 18
10. Способ обработки сферической поверхности детали. Кузьмин В.Ф. и др. Патент 2170649 РФ МКИ С2 7 В 23 С 3/16. Заявка № 99121981/02. Заявл. 15.12.99. Бюл. №20
11. Delcam на просторах России и стран СНГ //САПР и графика. 1999. №11.-С. 78-84.

Комсомольское-на Амуре авиационное производственное объединение

УДК 621.9.011

С.И.ПЕТРУШИН

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ И ЗАВИВАНИЯ СЛИВНОЙ СТРУЖКИ ПРИ НЕСВОБОДНОМ РЕЗАНИИ

Предложены и рассмотрены две схемы образования сливной стружки при несвободном резании криволинейным лезвием с плоской передней поверхностью: с единственной условной поверхностью сдвига и с развитыми зонами пластических деформаций. Приведены аналитические зависимости, описывающие геометрию и кинематику несвободного резания, а также напряженно - деформированное состояние зоны стружкообразования. Показана возможность применения полученных закономерностей для решения задачи описания процесса завивания сливной стружки.

Тенденция приближения формы и размеров заготовок к форме и размерам деталей машин приводит к смещению основной сферы применения обработки резанием в область

чистовой и отделочной обработки. Так, например, общий припуск на сторону на АО «АвтоВАЗ», составляет в среднем 3 мм. При этом значительно возрастает роль переходной (радиусной) части лезвия инструмента в формировании стружки, силовых и тепловых контактных нагрузок и, как следствие, в получении тех или иных величин стойкости и силы резания. В то же время подавляющее большинство исследований процесса образования стружки опирается на схему свободного резания, которая совершенно не учитывает геометрию лезвия в плане и трехмерный характер очага деформации срезаемого слоя. Эта ситуация привела к значительному несоответствию между теоретическими схемами стружкообразования и экспериментальными данными, получаемыми в реальных процессах формообразования резанием.

В работе [1] автором были предложены схемы стружкообразования при несвободном резании как с единственной условной поверхностью сдвига (УПС), так и с развитыми первичной и вторичной зонами пластических деформаций. Первая схема основана на допущении, что в сечениях, параллельных направлению схода стружки, угол сдвига имеет одно и то же усредненное значение для всей зоны стружкообразования, что, согласно формуле И.А.Тиме, равносильно постоянству коэффициента усадки стружки. Это позволило аналитически описать форму УПС для различной геометрии лезвия и определить направления схода стружки при существенно несвободном резании.

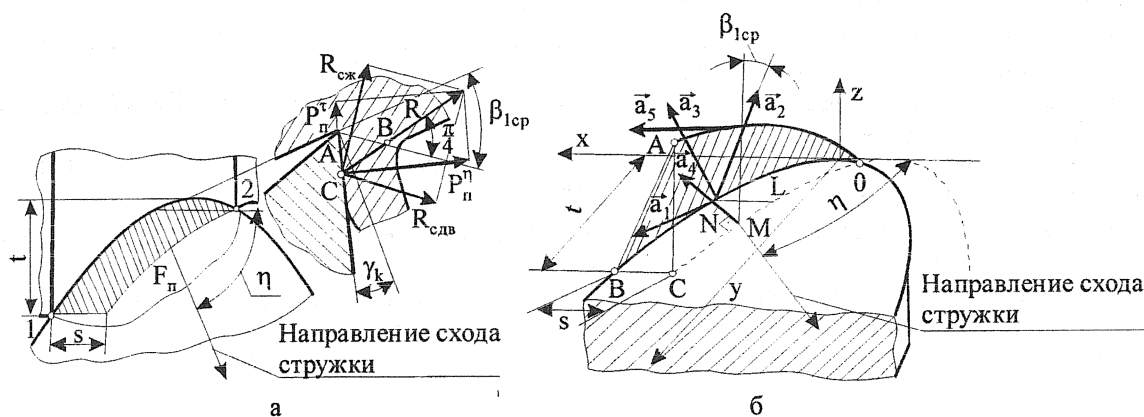


Рис. 1. Схема образования стружки с единственной поверхностью сдвига при несвободном резании: а – сечение корня стружки в направлении ее схода; б – форма УПС в общем виде

На рис.1, а изображено сечение корня стружки в направлении ее схода, характеристики которого идентичны для любой точки криволинейной режущей кромки 1 - 2. В отличие от ГОСТ 25762-83, где угол схода стружки отсчитывается от главной секущей плоскости, здесь направление схода стружки задается острым углом η , отсчитываемого от оси x . Средний угол сдвига для всех сечений равен

$$\beta_{1cp} = \arctg\left(\frac{P_n^n}{P_n^t}\right) + \gamma_k - \frac{\pi}{4}, \quad (1)$$

где P_n^n и P_n^t - соответственно нормальная и касательная сила на передней поверхности лезвия;

γ_k – кинематический передний угол (см. рис. 1.а), определяемый по формуле

$$\operatorname{tg} \gamma_k = \operatorname{tg} \gamma_c \cdot \sin(\varphi_c + \eta) + \operatorname{tg} \lambda_c \cdot \cos(\varphi_c + \eta), \quad (2)$$

где $\gamma_c, \lambda_c, \varphi_c$ - статические геометрические параметры в той точке режущей кромки, через которую проходит рассматриваемое сечение.

На рис.1, б показана форма условной поверхности сдвига для случая несвободного резания криволинейным лезвием с плоской передней поверхностью. УПС представляет собой замкнутый контур ОАВ, причем линия ОА ограничивает ее сверху, а ОВ (режущая кромка) - снизу. ОВ задается геометрией инструмента, а направляющий вектор касательной к линии ОА определяется выражением [1]

$$\vec{a}_5 = (\vec{a}_1 \times \vec{a}_2) \times \vec{a}_4, \quad (3)$$

где \vec{a}_1 - единичный направляющий вектор, касательный к режущей кромке;

\vec{a}_2 - единичный направляющий вектор, определяющий направление УПС, как линейчатой поверхности (см. рис.1, б);

\vec{a}_4 - исходящей из точки М направляющий вектор нормали к поверхности резания, образованной предыдущим положением режущей кромки.

Задаваясь конкретной формой режущей кромки, с помощью (3) можно определить уравнение линии ОА и тем самым рассчитать размеры и площадь УПС.

В предложенной на рис.1 схеме угол схода стружки η определяется численным методом (методом последовательных приближений) в соответствии с формулой

$$\eta = \arctg(F_x / F_y) \pm \lambda', \quad (4)$$

где F_x и F_y - площади проекций УПС на координатные плоскости.

В (4) знак «минус» берется для статического угла $\lambda_c > 0$ и знак «плюс» для $\lambda_c < 0$. Угол λ' , представляющий собой угол наклона рабочего участка режущей кромки ОВ, определяется из выражения:

$$\cos \lambda' = \frac{\cos^2 \gamma_c + \cos^2 \lambda_c \cos \psi \cos(\lambda_c + \psi)}{\sqrt{\cos^2 \gamma_c + \cos^2 \lambda_c \cos^2 \psi} \cdot \sqrt{\cos^2 \gamma_c + \cos^2(\lambda_c + \psi)}}, \quad (5)$$

где $\psi = \arccos(\sin \lambda_c \cdot \sin \gamma_c)$.

Преимуществом представленной выше схемы с единственной УПС является возможность аналитического описания кинематики несвободного резания для реальных схем металлообработки. В то же время, как и схема свободного резания с единственной плоскостью сдвига, она не может ответить на вопрос о динамических нагрузках и напряженно-деформированном состоянии (НДС) в зоне образования стружки. Поэтому в [1] предложена вторая расчетная схема образования стружки при несвободном резании, построенная на основе теории линий скольжения в пластической области. Она может быть использована для определения НДС как внутри, так и на границах зон пластичности, и это, в свою очередь, позволяет получить детальное нагружение лезвия инструмента контактными нагрузками.

На рис.2 приведена уточненная по сравнению с [1] схема стружкообразования с развитыми зонами пластических деформаций при несвободном резании для жестко-пластической модели обрабатываемого материала. Согласно предложенной выше гипотезе, в любом сечении, параллельном направлению схода стружки, задаваемым углом начального схода η , мы имеем одну и ту же качественную картину, а именно: в точке Е начинается граница перехода обрабатываемого металла из жесткого в пластическое состояние, выходящая на свободную поверхность под углом $\pi/4$. Линия скольжения ЕДКРР₁М

(линия Н.Н.Зорева) начала пластической деформации состоит из участков двух логарифмических спиралей ED и DK, прямолинейного отрезка KP, построенного из предположения постоянства касательных нагрузок τ^3 на задней поверхности. В точке G на задней поверхности, где заканчивается ее контакт с обработанной поверхностью заготовки, имеем центрированный веер линий скольжения RGP₁ и далее на свободную поверхность граничная линия скольжения выходит в точке M под углом $\pi/4$ к ней. Вторичная зона пластических деформаций сверху ограничена участком DH логарифмической спирали, ортогональной к спирали DK и отрезком прямой HO₁. Последний построен в предположении постоянства касательных нагрузок τ^n на пластическом участке контакта стружки с передней поверхностью и выходит на контактную поверхность под углом ω_0 , зависящим от условий трения между стружкой и инструментом.

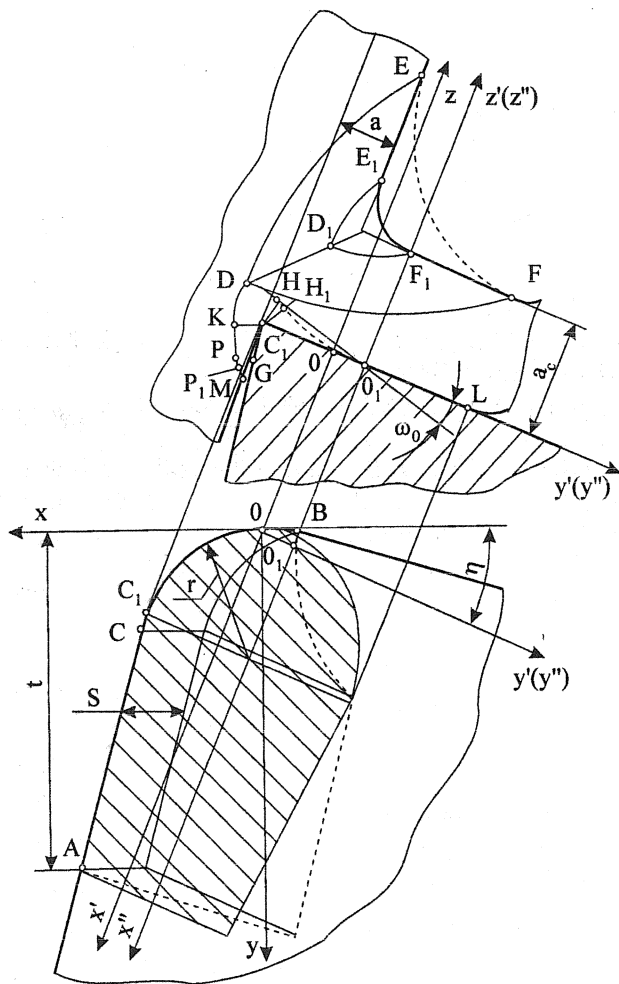


Рис.2. Схема образования сливной стружки с развитыми зонами пластических деформаций при наружном продольном точении: $t=2,0\text{мм}$, $S=0,5\text{мм/об}$, $\gamma=0$, $\lambda=0$, $\varphi=75^\circ$, $\epsilon\tau_1=15^\circ$, $r=2,0\text{мм}$, $\eta=23,4^\circ$

В точках D и D₁ имеем

$$\sigma_{cpD} = \sigma_{cpD_1} = -k(1 + \pi/2). \tag{7}$$

Первичная зона DEF построена для малых скоростей резания, когда пластическая деформация успевает развиться по всем поверхностям скольжения. При повышении скорости резания она сужается до размеров криволинейного треугольника D₁ E₁ F₁ (см. рис.2) за счет образования между точками D и D₁ единственной поверхности сдвига (шейки текучести) и уменьшения дуги переходной кривой А. А. Брикса с EF (показано пунктиром) до величины E₁F₁. Несмотря на такое видоизменение зоны стружкообразования в зависимости от скорости резания, расчет величины среднего напряжения в узловых точках границ и внутри зон пластичности остается одинаковым, так как оно зависит лишь от угла поворота линий скольжения [1]. Так, для точки E имеем $\sigma_{cp,E} = -k$, где k - максимальная величина касательных напряжений при пластической деформации, определяемая по формуле

$$k = \beta \cdot \sigma_T / 2,$$

(6)

где σ_T - предел текучести обрабатываемого материала, МПа;

β - коэффициент, зависящий от вида НДС; для плоского напряженного состояния ($t > S$, черновая обработка, широкая стружка) $\beta = 2/\sqrt{3}$; для плоского деформированного состояния ($t \approx S$, чистовая обработка, узкая стружка) $\beta = 1$.

Далее среднее напряжение снижается по линии DH, причем

$$\sigma_{срН} = -k(1 + \pi/2 - 2\omega_F) \quad (8)$$

и остается постоянным до точки O₁, то есть $\sigma_{срO_1} = \sigma_{срН}$.

В направлении задней поверхности ввиду симметричности спиралей DH и DK имеем $\sigma_{срК} = \sigma_{срН} = \sigma_{срР}$. От точки Р до Р₁ среднее напряжение снижается на величину угла поворота линии скольжения в секторе и равно $\sigma_{срР_1} = -k$. В точке М мы как бы вновь возвращаемся к условиям НДС в точке Е: $\sigma_{срМ} = -k$.

В таблице приведены формулы для расчета среднего напряжения в узловых точках сечения пластических зон. Эти значения даны без учета деформационного упрочнения и термического разупрочнения обрабатываемого материала, ведущего себя как жестко-пластическое тело.

Таблица

Узловые точки по схеме рис.2	Расчетная величина среднего напряжения $\sigma_{ср}$ для	
	плоского напряженного состояния	плоского деформированного состояния
Е, Е ₁ , F, F ₁ , D, D ₁	-0,577 σ_T -1,484 σ_T	-0,5 σ_T -1,285 σ_T
Н, К, O ₁ , Р, Р ₁ , М	-0,577(2,57-2 ω_0) σ_T -0,577 σ_T	-0,5(2,57-2 ω_0) σ_T -0,5 σ_T

Следует отметить, что на построение сетки линий скольжения в зоне вторичных пластических деформаций существенное влияние оказывает принятый закон распределения касательных нагрузок на поверхности трения между стружкой и лезвием. Так (см. рис.2) в случае распределения τ^n по закону перевернутой параболы [1] граничная линия скольжения проходит не по прямой HO₁, а по кривой H₁O₁, которая в точке H₁ имеет общую касательную с логарифмической спиралью DH.

Важное значение для аналитического описания очага пластических деформаций при несвободном резании имеет задача идентификации пятна силового контакта между стружкой и передней поверхностью лезвия. Автором [2] на основе изучения большого массива фотографий изношенной передней поверхности при обработке серого чугуна установлено, что силовой контакт имеет каплевидную форму с осью симметрии, перпендикулярной к направлению схода стружки. На рис.2 это показано штриховкой. Максимальная длина контакта соответствует точке С₁ режущей кромки. Динамическая система координат x'y'z' имеет начало в вершине лезвия O и ориентирована таким образом, что ось x' направлена вдоль оси пятна контакта, а ось y' - по направлению схода стружки. Переход от статических к динамическим координатам осуществляется с помощью формул перехода:

$$\begin{aligned} x' &= \sin \eta \cdot x_c + \cos \eta \cdot y_c; \\ y' &= -\cos \eta \cdot x_c + \sin \eta \cdot y_c; \\ z' &= z_c. \end{aligned} \quad (9)$$

Параллельный перенос динамической системы координат из точки O в точку O₁ позволяет определить в координатах x''y''z'' (см. рис.2) длины силового контакта в сечениях

вдоль оси x'' , начиная с точки В, и тем самым аналитически или численно описать форму контактного участка передней поверхности лезвия.

При обработке сталей пятно контакта имеет более сложную форму, чем при обработке чугунов [2]. Интегрируя результаты наблюдений, ее конфигурацию можно представить в виде контура, указанного на рис.2 штрих-пунктирной линией. Здесь длины контакта напрямую зависят от толщины срезаемого слоя в каждом сечении.

Зная величины среднего напряжения на границах и внутри зон пластичности, характеристики срезаемого слоя, форму и размеры пятна силового контакта стружки с лезвием, можно для несвободного резания решать ряд практически важных задач, а именно [1]: рассчитывать контактные нагрузки на передней и задних поверхностях резания, определять нормальные и касательные физические и технологические составляющие силы резания, получать поле контактных температур, прогнозировать топографию износа, определять параметры завивания стружки.

Рассмотрим возможные походы к решению последней задачи, которая по сложности явлений, происходящих в образовавшейся стружке, не уступает, на наш взгляд, процессу стружкообразования. Для этого необходимо вернуться к схеме с единственной УПС. На рис.3, а изображена сходящая в направлении оси y' стружка, основанием которой является УПС ОАВ. Поперечное сечение стружки $O'A'B'$ получается проектированием УПС на

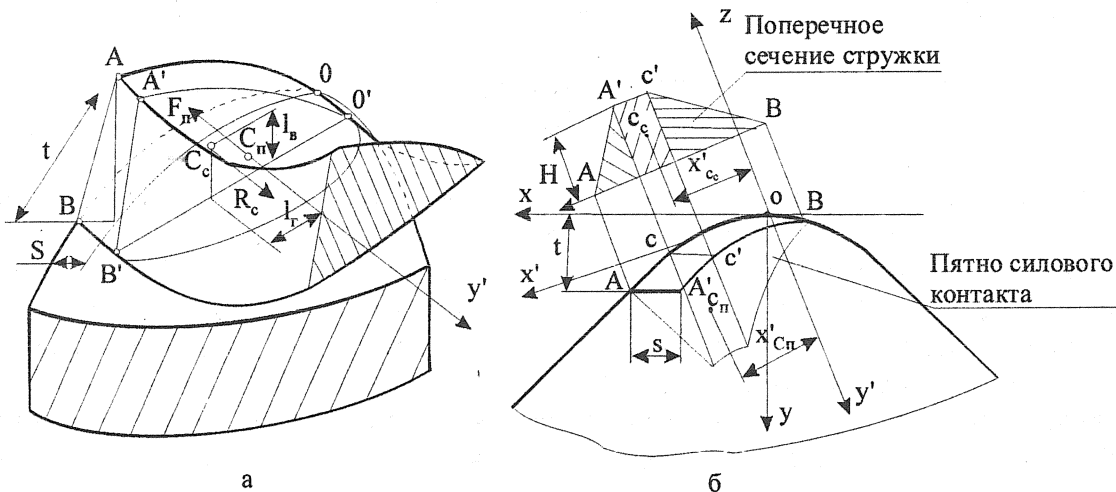


Рис.3. Схема завивания сливной стружки: а – общий вид; б - плоская схема

плоскость, перпендикулярную направлению схода y' . Пятно силового контакта описывается фигурой $OO'B'V$. Со стороны УПС на стружку действует интегральная сила стружкообразования R_c , параллельная y' и проходящая через точку c_c поперечного сечения. Со стороны передней поверхности в противоположном направлении действует интегральная сила трения F_n , точка приложения которой c_n расположена в центре пятна контакта. Согласно третьему закону Ньютона при постоянной скорости стружки имеем $R_c = F_n$. В общем случае точки приложения интегральных сил не совпадают и мы имеем две пары сил, изгибающие моменты от которых пропорциональны вертикальному l_b и горизонтальному l_r плечам (см. рис. 3, а)

На рис. 3, б приведена плоская интерпретация рассматриваемой схемы завивания стружки. Вертикальное плечо l_b будет соответствовать высоте точки c_c над передней по-

верхностью, а l_r определяется разностью координат x'_{c_c} и x'_{c_n} . Положение центров c_c и c_n определяется формами поперечного сечения стружки и пятна силового контакта, а также закономерностями распределения напряжений на УПС, ориентированных вдоль оси y' , и касательных нагрузок на передней поверхности. Так, если принять последние равномерно распределенными, то эти центры совпадут с центрами тяжести криволинейных фигур $O'A'B'$ и $OO'B'V$ (см. рис. 3, а). На самом деле распределение касательных контактных нагрузок является неравномерным. Общепринято, что на длине пластического контакта они постоянные, а на упругом - снижаются до нуля. Распределение напряжений $\sigma_{y'}$ со стороны УПС можно определить, зная средние напряжения, по формуле

$$\sigma_{y'} = \sigma_{cp} + k \cdot \sin 2\omega, \quad (10)$$

где ω - угол наклона граничных линий скольжения к оси y' .

Используя данные таблицы, на рис.4 приведен пример распределения по толщине стружки напряжений σ_{cp} , $\sigma_{y'}$ и относительной деформации вдоль стружки ϵ . Из него следует, что стружка в зоне контакта представляет собой неравномерно сжатый стержень, который, двигаясь по передней поверхности, испытывает с ее стороны воздействие, препятствующее одновременной разгрузке от этих внутренних напряжений. В точке L (см. рис.2) происходит полная разгрузка стружки и ее упругое восстановление на величину остаточной деформации сжатия $\epsilon_{ост}$. Для каждой точки поперечного сечения

$$\epsilon_{ост} = \sigma_{y'} / E, \quad (11)$$

где E - модуль упругости материала стружки.

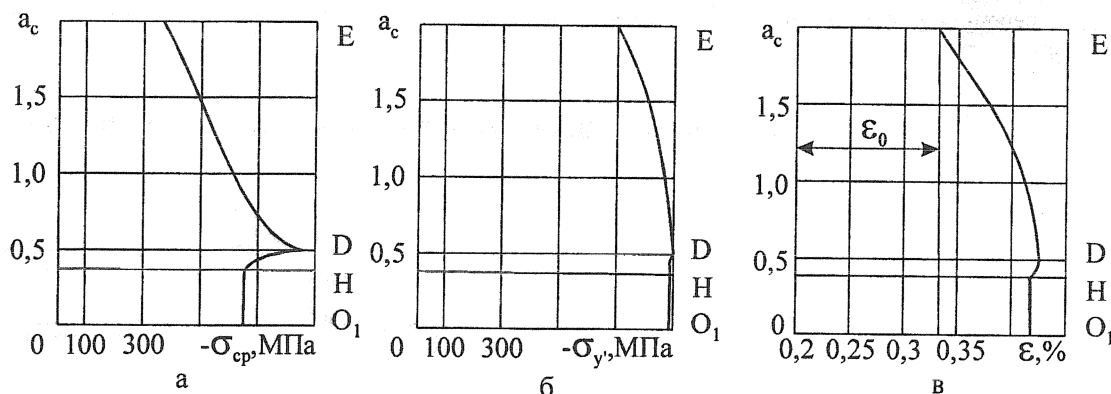


Рис. 4. Распределение по толщине стружки для условий $\sigma_r = 600$ Мпа, $a = 1$ мм, $K_a = 2$: а - среднего напряжения; б - нормального напряжения вдоль оси y' ; в- относительной деформации вдоль оси y'

С другой стороны для неравномерно сжатого стержня, применяя гипотезу плоских сечений, имеем [1]:

$$\epsilon_{ост} = \epsilon_0 - \frac{d\varphi}{dy'} \cdot z + \frac{d\psi}{dy'} \cdot x', \quad (12)$$

где ϵ_0 - деформация равномерно сжатого стержня стружки (см. рис. 4, в);

φ и ψ - углы поворота сечения стружки относительно осей x' и z' , соответственно.

В свою очередь

$$\frac{d\varphi}{dy'} = - \frac{\int_f \sigma \cdot z \cdot df}{E \cdot I_x}; \quad (13)$$

$$\frac{d\psi}{dy'} = \frac{\int_f \sigma \cdot x' \cdot df}{E \cdot I_z}, \quad (14)$$

где f - площадь поперечного сечения стружки;

I_x и I_z - моменты инерции сечения стружки относительно главных осей.

Радиусы завивания стружки в вертикальной и горизонтальной плоскостях вокруг главных осей инерции ее поперечного сечения пропорциональны выражениям (13) и (14).

Предложенный подход к решению задачи завивания сливной стружки реализован путем создания компьютерной программы численных расчетов, использованной для моделирования стружкоформирующих элементов на передней поверхности сменных многогранных пластин [3].

В заключение следует отметить, что описанные в данной работе схемы образования и завивания стружки при несвободном резании по мере их дальнейшего развития позволят решить практические задачи лезвийной металлообработки и перейти, наконец, от эмпирических зависимостей по силе резания и стойкости инструментов к расчетным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петрушин С.И. Введение в теорию несвободного резания материалов. Учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 1999.- 97с.
2. Петрушин С.И., Грубый С.В. Обработка чугунов и сталей сборными резцами со сменными многогранными пластинами. – Томск: Изд. ТПУ, 2000.- 156с.
3. Петрушин С.И., Корчуганова М.А. Методика проектирования стружколомающих элементов на передней поверхности режущей части инструментов. // Вестник машиностроения. – 2000. № 6.-С.38 - 43.

Томский политехнический университет, Юргинский филиал

УДК 621.41

Г.Г.ПОЗНЯК, В.А.РОГОВ, А.С.КОШЕЛЕНКО

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В ПРИРЕЗЦОВОЙ ЗОНЕ СТРУЖКИ

Рассчитываются напряжения в области стружки, прилегающей к передней поверхности режущего клина, строятся поля изолиний напряжений и линий скольжения. Нормальная и тангенциальная распределенная нагрузка на участках контакта режущего клина со стружкой и обработанной поверхностью выбрана на основе опубликованных экспериментальных данных.

Известны различные подходы [3, 5 и др.] к математическому описанию напряженно-деформированного состояния металла в зоне стружкообразования (ЗСО). В силу взаимосвязанности многих параметров при аналитическом рассмотрении исследователи вынуж-