

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ И СИЛ РЕЗАНИЯ ПО ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ МАТЕРИАЛОВ

Праведников И.С.

Уфимский государственный авиационный технический университет

ВВЕДЕНИЕ

Основой процесса резания металлов является пластическая деформация как срезаемого слоя, в результате чего он превращается в стружку, так и деформация поверхности резания и обработанной поверхности.

Внешние силы, приложенные со стороны передней поверхности, образуют пластическую зону, в которой сдвиг элементов срезаемого слоя происходит одновременно по различным направлениям, но с постоянной интенсивностью.

На практике резания различных материалов наблюдается значительное сужение пластической зоны так, что ее величина достигает нескольких микрон. В связи с этим можно допустить, что процесс стружкообразования является простым сдвигом элементов малой толщины. Экспериментальные исследования процесса резания материалов показали на цикличность сдвигов, что подтверждается пилообразным рельефом внешней стороны стружки.

Кроме первичной деформации частицы происходит ее вторичная деформация в зоне контакта стружки с передней поверхностью или в зоне контакта фаски износа инструмента с поверхностью резания. В результате вторичной деформации, которая происходит под действием сил схватывания, наблюдается искривление текстуры как в прирезцовой стороне стружки, так и в приконтактном слое поверхности резания, что приводит к существенному росту напряжений и температур резания. Следовательно, изучение изменений физико-механических свойств материалов под действием температуры – это необходимое условие для установления сущности многих явлений и теоретического расчёта напряжений и сил резания, возникающих в процессе обработки материалов резанием.

ВЗАИМОСВЯЗЬ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ

Определение взаимосвязи между напряжениями и деформациями при стружкообразовании является главной задачей при теоретическом расчете сил резания. Разнообразие условий, оказывающих влияние на величину напряжений при пластической деформации, усложняет определение их взаимосвязи с деформацией в виде общего закона, аналогичного закону Гука. Обычно эта взаимосвязь устанавливается различными эмпирическими формулами, которые находят экспериментальное подтверждение только в определённых ограниченных условиях деформирования. Из теоретических работ в этой области наибольшую значимость представляют исследования В.Д.Кузнецова и М.А.Большаниной, которые показали, что пластическая деформация всегда сопровождается двумя конкурирующими процессами – упрочнением и отдыхом. Анализ взаимосвязи между упрочнением и отдыхом привёл М.А. Большанину к теоретическому обоснованию экспериментально установленного ей уравнения политропы сжатия, имеющего вид

$$\sigma = \sigma_0 \left(\frac{h_0}{h} \right)^n \quad (1)$$

где σ – истинное напряжение; σ_0 – условный предел текучести; n – показатель политропы сжатия; h_0 – высота образца до сжатия; h – высота образца в данный момент деформации.

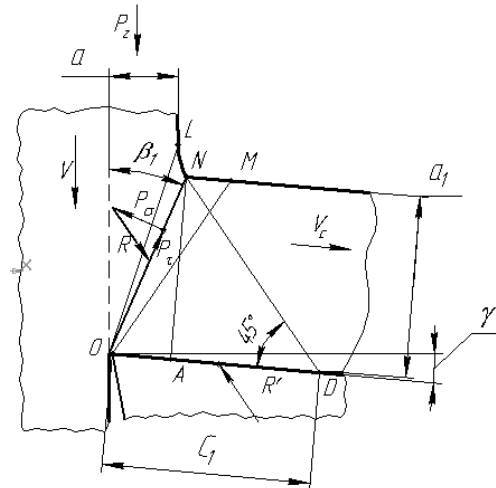


Рис.1. Схема сил, действующих при образовании элемента стружки

На рис.1 представлена модель с развитой зоной деформации металла срезаемого слоя. В данном исследовании не определялось поле линий скольжения в зоне деформации. Исследование базировалось лишь на геометрии граничных линий зоны. Предполагалось, что материал идеально пластичен и касательные напряжения по линиям ON , OM , OD равны напряжениям материала при сдвиге, следовательно, $\tau_{ON} = \tau_{OM} = \tau_{OD} = \tau_s$.

Из системы сил, изображенных на рис.1, следует, что в условиях простого сдвига сопротивление деформации при стружкообразовании

$$P_z = P_\tau \cdot \cos \beta_1 + P_\sigma \cdot \sin \beta_1 \quad (2)$$

Если обе части равенства (2) разделить на площадь сдвига, то получим

$$P_{эф} = \tau \cdot \cos \beta_1 + \sigma \sin \beta_1 \quad (3)$$

где τ – среднее касательное напряжение; σ – среднее нормальное напряжение на плоскости сдвига.

При расчете сил резания величина $P_{эф}$ в уравнении (3) является эффективным удельным сопротивлением стружкообразованию, так как рассчитывается на единицу той площади, по которой, при данных условиях процесса резания, происходит сдвиг элемента среза.

Для условий простого сдвига при резании количественной характеристикой степени деформации среза является относительный сдвиг

$$\varepsilon = ctg \beta_1 + tg(\beta_1 - \gamma) \quad (4)$$

Учитывая общность законов упрочнения и разупрочнения при различных видах деформации, можно предположить, что

$$P_{\text{эф}} = C \cdot \varepsilon^m, \quad (5)$$

где C – удельное сопротивление стружкообразованию при относительном сдвиге $\varepsilon=1$; m – обобщенный показатель, зависящий от упрочнения, температуры деформации и скорости деформации.

Для распространенных на практике условий резания материалов можно принять, что влияние температурно-скоростного фактора на касательные напряжения, действующие в плоскости сдвига, несущественно. Поэтому эффективное напряжение, определяемое по формуле (5), может быть приравнено к эффективному напряжению, получаемому из условия равновесия внешних и внутренних сил.

Следовательно,

$$P_{\text{эф}} = \tau \cdot \cos \beta_1 [1 + \operatorname{tg}(\beta_1 + \theta - \gamma) \operatorname{tg} \beta_1] = C \cdot \varepsilon^m. \quad (6)$$

По аналогии с уравнением политропы пластического сжатия (1), формула (6) является политропой стружкообразования и дает новые возможности теоретического определения напряжений в плоском сдвиге и сил резания.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ СТРУЖКООБРАЗОВАНИИ И СЖАТИИ

Общие закономерности прохождения пластической деформации при стружкообразовании и сжатии позволяют установить связь между показателями упрочнения материалов и основными константами политропы стружкообразования. Для этого необходимо выбрать такие характеристики деформации, которые бы связывали оба процесса с достаточной точностью.

Как показано в работе [1], оптимальной характеристикой, по величине которой наиболее точно можно сравнивать различные виды пластической деформации, является истинный октаэдрический (псевдомаксимальный) сдвиг $g_{\text{окт.макс}}$.

При определении эквивалентных деформаций при стружкообразовании и сжатии необходимо исходить из равенства $g_{\text{окт.макс}}$.

При распространенных на практике условиях резания стружкообразование может рассматриваться как деформация простого сдвига.

Тогда $l_1 = -l_2$, $l_3 = 0$, а

$$g_{\text{окт.макс}} = 2\sqrt{\frac{2}{3}}l_1, \quad (7)$$

где l_1 , l_2 , l_3 – главные истинные удлинения.

При простом сдвиге по данным П.О.Пашкова

$$l_1 = \ln\left(\frac{\varepsilon}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{\varepsilon^2 + 4}\right), \quad (8)$$

где ε – тангенс угла сдвига, т.е. относительный сдвиг.

Подставив значение l_1 из формулы (8) в формулу (7), получим, что для простого сдвига

$$g_{окт.макс} = 2\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \ln\left(\frac{\varepsilon}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{\varepsilon^2 + 4}\right) \quad (9)$$

При простом сжатии образца круглого поперечного сечения

$$l_2 = l_3 = \ln \frac{d_0}{d_k} = -\ln \frac{d_k}{d_0}, \quad (10)$$

где d_0 и d_k – начальный и конечный диаметр сжимаемого образца.

Исходя из постоянства объема образцов

$$\frac{h_0}{h} = \left(\frac{d_k}{d_0}\right)^2, \quad (11)$$

для сжатия получим

$$g_{окт.макс} = \sqrt{2} \ln \frac{h_0}{h} \quad (12)$$

Приравняв правые части равенства 9 и 12, находим

$$\frac{h_0}{h} = e^{2\sqrt{3}/3 \ln\left(\frac{\varepsilon}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{\varepsilon^2 + 4}\right)} \quad (13)$$

где e – основание натуральных логарифмов.

Уравнение (13) определяет условие эквивалентных деформаций при стружкообразовании и сжатии и получено, исходя из равенства в этих процессах истинных октаэдрических сдвигов.

Согласно условию Губбера-Мизеса, пределы текучести на растяжение (сжатие) и на сдвиг связаны зависимостью

$$\tau_s = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

Распространяя это условие на процесс конечных, значительных по величине, пластических деформаций при сжатии, получим

$$\tau = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \left(\frac{h_0}{h}\right)^n \quad (15)$$

Используя уравнение (15) и условие эквивалента (13), получим теоретическое уравнение для расчёта касательных напряжений τ на плоскости сдвига при стружкообразовании

$$\tau = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \cdot e^{\frac{n}{1,15} \ln\left(\frac{\varepsilon}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{4+\varepsilon^2}\right)}. \quad (16)$$

Чтобы определить эффективное напряжение, касательное напряжение и силы резания, необходимо знать константы C и m .

Из уравнения политропы стружкообразования (6) следует, что постоянная C может быть определена из условия $\varepsilon=1$. Учитывая, что при $\varepsilon=1$ ($\beta_1=\gamma=45^\circ$) угол

трения составляет 45° , уравнение (6) примет вид

$$\tau \cdot \sqrt{2} = C \quad (17)$$

Для $\varepsilon=1$ согласно (9) значение C можно рассчитать из уравнения

$$C = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot (1,74)^n \cdot \sigma_0 \quad (18)$$

Формула (18) устанавливает связь постоянной C с условным пределом текучести σ_0 . Следовательно, постоянная C может быть определена по результатам механических испытаний обрабатываемых материалов на сжатие.

Например, значения C , рассчитанные по формуле (18), и значения m для всех групп материалов приведены в табл.1.

Значения параметров политропы стружкообразования

Таблица 1

Обрабатываемый материал	HB	Hv	σ_0 , МПа	C , МПа	n	m	$\frac{C}{HB}$
ХН60В	247	250	790	990	0,82	0,295	4
ХН77ТЮ	288	292	920	1150	0,73	0,286	4
ХН70ВМТЮ	321	328	1020	1280	0,68	0,272	3,8
ХН70ВМФТЮ	329	337	1050	1310	0,72	0,276	3,9
ХН73МБТЮ	340	349	1090	1360	0,72	0,270	4
ХН55ВИТФКЮ	393	413	1270	1420	0,61	0,239	3,6
ХН51ВМПОВКР	404	427	1290	1550	0,59	0,212	3,82
ВТ1-1	160	165	550	610	0,33	0,51	3,8
ВТ3-1	310	316	1040	1080	0,27	0,43	3,3
ВТ5	288	292	1060	980	0,31	0,45	3,4
ВТ8	329	337	1100	1050	0,25	0,32	3,15
ВТ9	319	326	1060	960	0,28	0,41	3,0
ВТ22	329	337	1120	1060	0,26	0,37	3,2
30ХГСА	180	184	880	1200	0,37	0,71	5,8
40ХНМА	220	225	1170	1450	0,28	0,61	6,9
13Х11Н2В2МФШ	345	358	1180	1580	0,33	0,45	4,7
12Х18Н9Т	165	168	650	980	0,45	0,73	6,0
15Х18Н12С4ТЮ	329	337	1080	1520	0,35	0,47	4,7

В общем случае для отдельной группы материалов, используя формулу (13), можно получить

$$P_z = C \cdot \varepsilon^m \frac{F_0}{\sin \beta_1} \quad (19)$$

Для расчета силы P_z по формуле (19) необходимо определить константы сплавов C и m по результатам механических испытаний, далее из экспериментов определить усадку стружки ξ_a . Угол сдвига β_1 и относительный сдвиг могут быть рассчитаны по теоретическим формулам [2].

В производственных условиях, как известно, поступающие партии обрабатываемых материалов отличаются по своим физико-механическим свойствам. Поэтому целесообразно найти связь между твердостью HB и константой C . В то же

время твердость любого сплава определяется самыми разнообразными методами и после оптимальных расчетов может быть приведена к твердости HB .

Из таблицы (1) видно, что соотношение C/HB зависит от склонности материалов к упрочнению и для группы жаропрочных сплавов равно 3,9.

По данным работы [3], для группы углеродистых сталей отношение C/HB сохраняется постоянным и равно 5,3. Это позволяет определить C по модулю упрочнения из уравнения $C=5,3 HB$.

Для группы титановых сплавов получено отношение $C=3,4HB$.

На основании полученных закономерностей разработана номограмма по определению коэффициента C и показателя политропы m для трёх групп материалов (см. рис.2).

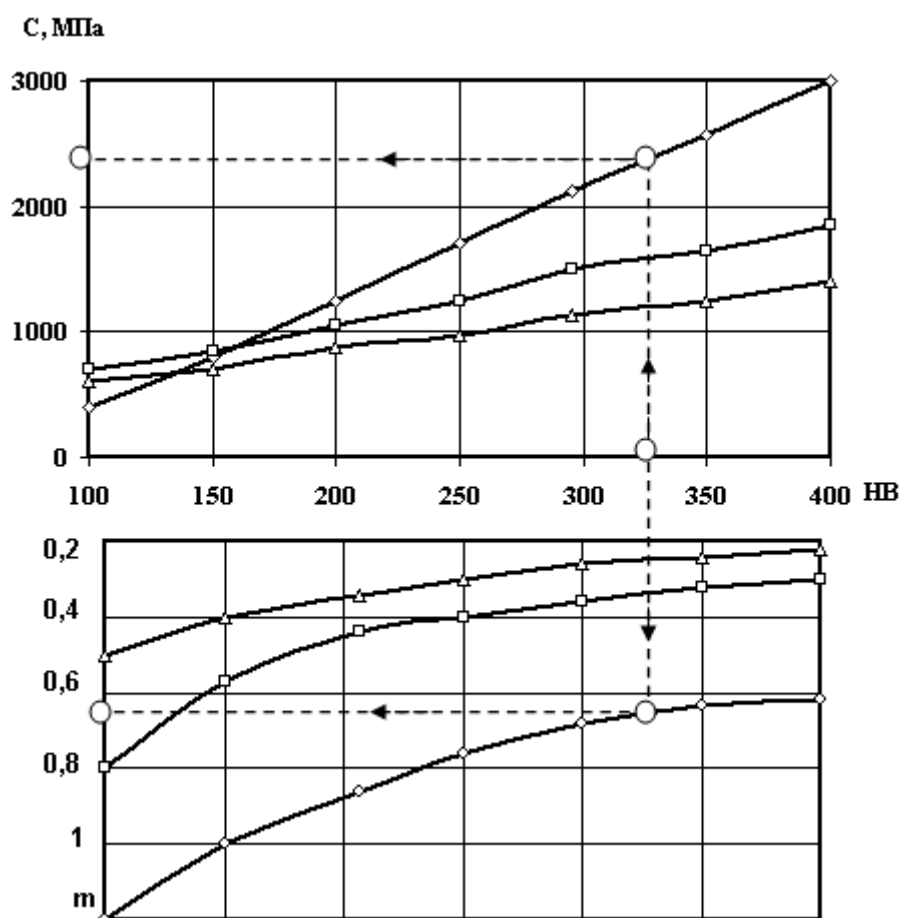


Рис.2. Влияние твердости материалов различных групп на константы и политропы стружкообразования: Δ – жаропрочные сплавы; \square – титановые сплавы; \diamond – углеродистые и легированные стали

В работе [98] указано, что C можно определить по твердости любого материала HB из уравнения:

$$C = \lambda(1 - d/D)HB \quad (20)$$

где λ – безразмерный коэффициент связи; d/D – отношение диаметра отпечатка к

диаметру шарика, соответствующее твердости HB .

Подставив величину C из равенства (20) в зависимость (19) получим

$$P_{\text{эф}} = \lambda(1 - d/D) \cdot HB \cdot \varepsilon^m \quad (21)$$

В общем случае взаимодействия задней и передней поверхности неизношенного резца сила резания P_z может быть рассчитана по формуле

$$P_z = 1,2(1 - d/D)HB \cdot \varepsilon^m \cdot F_0 / \sin \beta_1 \quad (22)$$

Для определения ε и β_1 при заданном режиме резания и геометрии режущей части инструмента достаточно знать усадку стружки ξ_a . Определение ξ_a не представляет особых трудностей и может быть легко осуществлено в производственных условиях.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ФОРМУЛ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

В производстве в условиях свободного и несвободного резания часто используются такие соотношения между шириной и толщиной среза, при которых усадка больше, а иногда и значительно больше единицы.

На основании равенства объемов металла среза и стружки имеем

$$\xi_a = 1/\xi_b \cdot \xi_1, \quad (23)$$

где ξ_a – усадка по толщине среза; ξ_b – усадка по ширине среза; ξ_1 – усадка по длине среза.

Определение усадки ξ_1 производится сравнительно просто. В то же время определение усадок ξ_a и ξ_b зависит от отношения ширины среза (b_0) к его толщине (a_0). Из этого следует, что главным фактором, определяющим величину усадки стружки ξ_b , является соотношение b_0/a_0 .

Для группы жаропрочных сплавов на никелевой основе и сталей эта зависимость описывается уравнением

$$1/\xi_b = 0,72(b_0/a_0)^{0,085}, \quad (24)$$

Для экспериментальной проверки полученных теоретических закономерностей для силы P_z были взяты три марки жаропрочных сплавов ХН70ВМТЮ, ХН55ВИТФКЮ и ХН51ВМТЮВКР. Опыты проводились при несвободном резании ($\gamma=0^\circ$; $r=0,2$ мм; $\phi=45^\circ$; $\phi_1=75^\circ$). Сила резания P_z и усадка стружки измерялись в определенные промежутки времени, что повышало точность сравнения. На рис.3 представлены зависимости $P_{zm}(V)$ и $P_{z\text{э}}(V)$. Как установлено, экспериментальная зависимость $P_{z\text{э}}(V)$ носит сложный характер. Теоретический расчет сил резания P_{zm} по величине усадки стружки для менее жаропрочного сплава ХН70ВМТЮ (рис.3) показал хорошую сходимость их с экспериментом во всем диапазоне рассмотренных скоростей резания.

Измерение сил резания при обработке сплава ХН55ВИТФКЮ связано с быстрым износом инструмента. Поэтому, начиная с $V>30$ м/мин для

ХН55ВИТФКЮ силы резания, рассчитанные по усадке стружки, меньше сил резания, определенных с помощью динамометра и не превышала 15%.

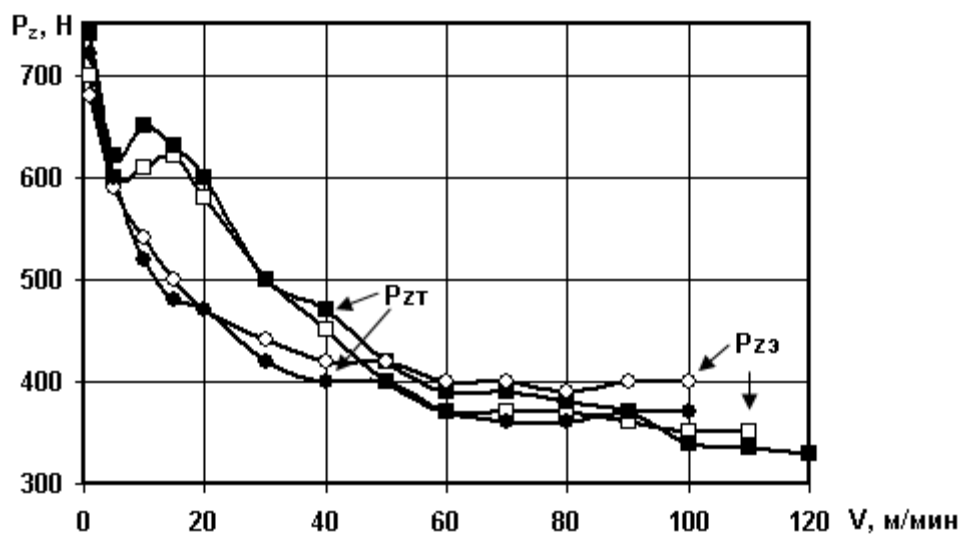


Рис.3. Влияние скорости резания на экспериментальную расчетную силу резания ($S=0,11$ мм/об; $t=0,75$ мм; $\gamma=0^\circ$): \diamond, \blacklozenge – ХН70ВМТЮ; \square, \blacksquare – ХН55ВИТФКЮ

Влияние подачи и глубины резания на теоретическое и экспериментальное значение силы P_z показано на рис.4 и 5. Как можно заметить, некоторое отличие $P_{zт}$ от $P_{zэ}$ наблюдается в области больших подач и глубин, что, по всей вероятности, связано с резким возрастанием износа по задней грани, а также с определённым влиянием усадки стружки по ширине.

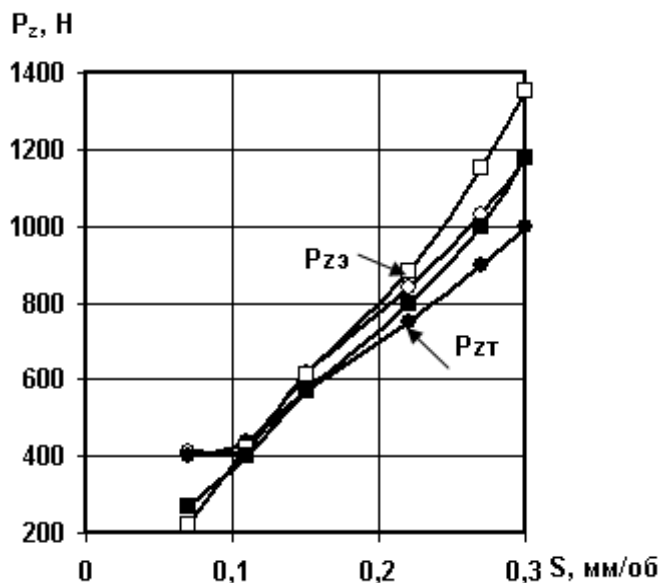


Рис.4. Влияние подачи на экспериментальную и расчётную силы резания ($V=40$ м/мин; $t=0,75$ мм; $\gamma=0^\circ$): \diamond, \blacklozenge – ХН70ВМТЮ; \square, \blacksquare – ХН51ВМТЮВКР

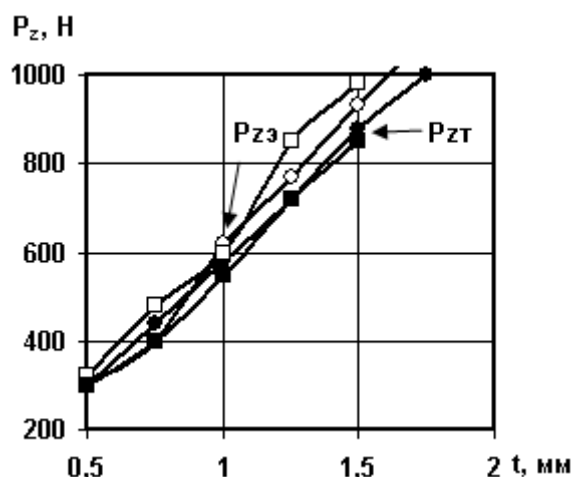


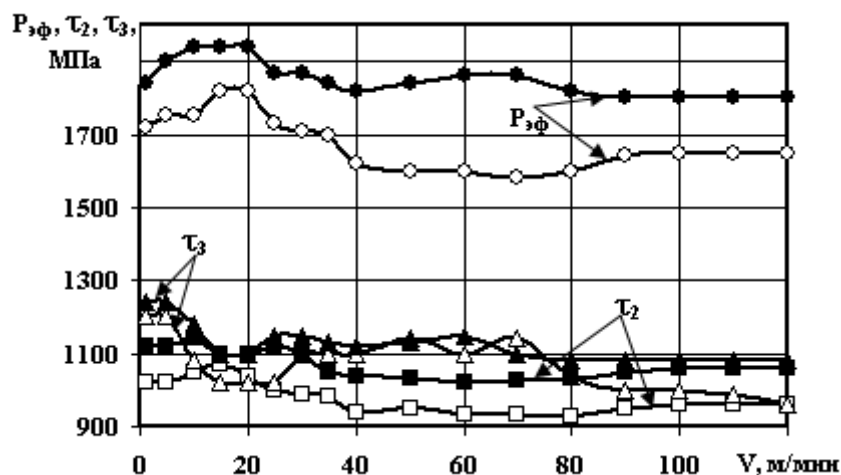
Рис.5. Влияние глубины на экспериментальную и расчётную силы резания ($V=40$ м/мин; $S=0,11$ мм/об; $\gamma=0^\circ$): ◇, ◆ – ХН70ВМТЮ; □, ■ – ХН51ВМТЮВКР

Таким образом, из приведенных на рис.3, 4 и 5 сопоставлениях сил P_z видно, что, несмотря на широкий диапазон изменения условий процесса резания и твердости обрабатываемых сплавов ($HB=321-404$), отклонение расчетных значений сил P_z от опытных во всех случаях не превышало 15 %.

Установление напряженного состояния зоны стружкообразования является сложной задачей, которая даже для простейшего случая резания решена лишь в первом приближении. Причина этого заключается в том, что существующие аналитические и экспериментальные методы не позволили определить параметры напряженного состояния из-за неправильного выбора условий эквивалентных деформаций при стружкообразовании и сжатии. Исследования, проведенные автором [], показали, что оптимальной характеристикой, по величине которой наиболее правильно сравнивать различные виды пластической деформации, является истинный октаэдрический сдвиг (7), который может быть рассчитан по формуле (9) и используется при расчёте силы резания P_z (19) и (22) и эффективного удельного сопротивления стружкообразованию $P_{эф}$ (6) и (21). Таким образом, зависимость эффективного удельного сопротивления стружкообразованию $P_{эф}$ от скорости резания, позволит установить те закономерности, которым подчиняется процесс пластической деформации металла, превращаемого в стружку, с учётом физико-механических свойств обрабатываемого материала.

В качестве примера на рис.6 представлены теоретические расчёты касательных напряжений: на плоскости сдвига ON – τ_2 , подсчитанное по формуле (16), и на плоскости сдвига OD – τ_3 , полученное при измерении микротвёрдости контактного слоя стружки при обработке сплавов ХН70ВМТЮ и ХН73МТЮК в зависимости от скорости резания. Во всём диапазоне рассмотренных скоростей резания, как по величине, так и по форме, кривые $\tau_2(V)$ и $\tau_3(V)$ полностью совпадают для обоих материалов. Следовательно, геометрия граничных линий развитой зоны деформации срезаемого слоя первоначально образуется на передней поверхности режущего инструмента по линии застойной зоны OD .

На основании уравнения (21), зная величины C и m для данных сплавов (см. табл.1), было рассчитано эффективное удельное напряжение стружкообразованию $P_{эф}$. Представленные на рис.6 кривые $P_{эф}(V)$ показали, что максимальная величина напряжения для сплава ХН70МВТЮ – 1970 МПа наблюдается на скорости 20 м/мин, а для сплава ХН73МТЮК – 1940 МПа – на скорости 15 м/мин. На оптимальной скорости резания $V=30$ м/мин величина эффективного напряжения равнялась соответственно 1710 и 1870 МПа, что по интенсивности износа резца



доказывает худшую обрабатываемость сплава ХН73МТЮК, т.е. при более высоком эффективном напряжении интенсивность износа резца возрастает.

Рис. 6. Влияние скорости резания на расчётные значения удельного напряжения $P_{эф}$, касательного напряжения плоскости сдвига τ_2 и касательного напряжения на передней поверхности инструмента τ_3 :

\circ, Δ, \square – ХН70МВТЮ; $\bullet, \blacktriangle, \blacksquare$ – ХН73МТЮК

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных теоретических исследований разработаны математические зависимости, устанавливающие связь деформаций, напряжений и сил при стружкообразовании с физико-механическими свойствами материалов на основе железа, никеля и титана. Основой этой связи является уточненное уравнение политропы стружкообразования для первой зоны сдвига.

На основе энергетической теории пластичности, политропы напряжений для сжатия и предложенных в работе условий эквивалентных деформаций при стружкообразовании и сжатии выведено и подтверждено экспериментально теоретическое уравнение для расчета касательных напряжений в первой зоне сдвига по физико-механическим характеристикам различных материалов и величине относительного сдвига.

Выявлена количественная связь констант уравнения политропы стружкообразования с константами уравнения политропы напряжений для высокотемпературного сжатия, определяющих влияние физико-механических свойств материалов на удельное сопротивление пластической деформации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Куфарев Г.Л., Окенов К.Б., Говорухин В.А. Стружкообразование и качество обработанной поверхности при несвободном резании. – Фрунзе: Мектеп, 1970. – 170 с.
2. Армарего И.Д., Браун Р.Х. Обработка металлов резанием. – М.: Машиностроение, 1977. – 325 с.
3. Праведников И.С. Элементы физико-механических основ сопротивления резанию жаропрочных сплавов // Оптимизация процессов резания жаро- и особопрочных материалов: Межвуз. темат. научн. сб./Уфимск. авиац. ин-т. – Уфа, 1984, – С. 119-128.