

УДК 621.9: 658.5

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛ НА ЗАДНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЛЕЗВИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Ивченко Т.Г.

(ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Введение

Силовые характеристики процесса резания в значительной мере определяют эффективность эксплуатации режущего инструмента. Современные тенденции роста производительности за счет повышения режимов механической обработки приводят к существенному увеличению нагрузок на режущий инструмент, в связи с чем растет и актуальность задач по их исследованию.

В настоящее время вопросы определения сил резания достаточно хорошо проработаны. В результате теоретических исследований, основанных, прежде всего, на работах Зорева Н.Н. [1, 2], созданы аналитические модели определения сил в зоне стружкообразования, на передней и задней поверхностях лезвия инструмента. На основании многочисленных экспериментальных исследований разработана справочно-нормативная база для расчета сил резания в различных условиях механообработки. Современные исследования закономерностей функционирования режущего инструмента развиваются в направлении математического моделирования процесса резания, и в первую очередь – моделирования нагрузок, действующих на лезвие инструмента [3, 4].

Силы, действующие на передней и задней поверхностях лезвия режущего элемента, отличаются друг от друга по величине и направлению. Как правило, силы на задней поверхности малы по сравнению с силами на передней поверхности. Поэтому при рассмотрении баланса сил, действующих в процессе резания, силами на задней поверхности часто пренебрегают. В связи с этим вопросам определения сил на задней поверхности уделяется значительно меньшее внимание, чем на передней, удобные для использования методики их расчета практически отсутствуют.

Однако при значительном износе силы на задних поверхностях могут быть велики, и даже превышать силы на передней поверхности. В таких случаях даже приближенный анализ баланса сил, действующих в процессе резания, становится невозможным без учета сил на задней поверхности. Определение контактных усилий по задней поверхности инструмента с использованием численных методов расчета [5] весьма затруднительно для широкого диапазона условий механообработки.

Целью настоящей работы является исследование закономерностей формирования сил на задней поверхности лезвия инструмента и создание удобной для практического применения аналитической методики их определения.

Основное содержание и результаты работы

В процессе резания задняя поверхность инструмента соприкасается с обрабатываемым материалом и подвергается износу, причем режущая кромка несколько закругляется. Площадь образующейся фаски износа определяет площадь контакта задней поверхности с обрабатываемым материалом. Схематически профиль изношенной задней поверхности инструмента представлен на рис. 1. Полагается, что профиль задней поверхности является симметричным относительно центра фаски износа и что кривизной поверхности резания можно пренебречь [1].

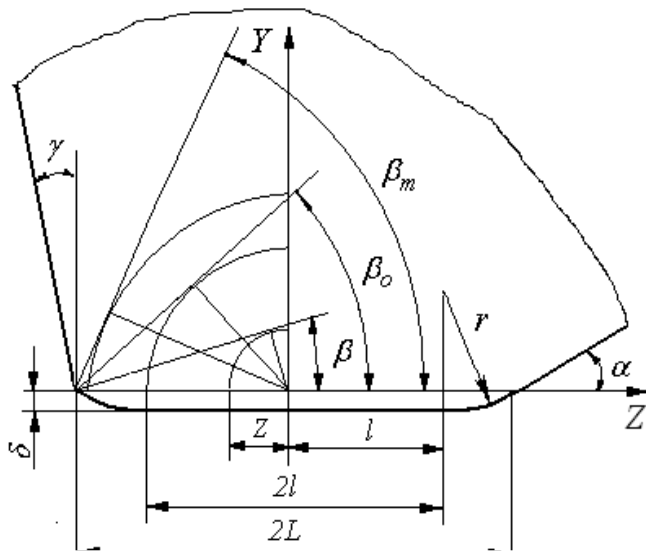


Рис. 1. Схематическое изображение профиля изношенной задней поверхности лезвия инструмента

L – полуширина контакта заданной поверхности с обрабатываемым материалом, или полуширина фаски износа заданной поверхности; l – полуширина плоской части фаски износа заданной поверхности; r – радиус кривизны краев фаски износа заданной поверхности; γ , α – передний и задний углы лезвия инструмента соответственно; δ – глубина внедрения заданной поверхности лезвия в обрабатываемую деталь; Z – абсцисса рассматриваемой точки на поверхности контакта, или расстояние рассматриваемой точки от середины ширины контакта; β_0 , β – вспомогательные параметры, которые определяются следующим образом:

$$\beta_0 = \arcsin(l/L); \beta = \arcsin(Z/L) \quad (1)$$

Контакт заданной поверхности с обрабатываемым материалом в основном можно считать упругим, так как условие пластичности выполняется только у режущей кромки, где контактные напряжения достигают максимума. Такие условия контакта можно рассматривать как случай вдавливания узкого длинного штампа с округленными краями, вблизи которых обрабатываемый материал переходит в пластичное состояние. Выражение для нормального давления на поверхности контакта имеет вид [1]:

$$p = \frac{2N \left[\sin \beta \ln \left| \frac{\sin(\beta + \beta_0)}{\sin(\beta - \beta_0)} \right| + \sin \beta_0 \ln \left| \operatorname{tg} \left(\frac{\beta + \beta_0}{2} \right) \operatorname{tg} \left(\frac{\beta - \beta_0}{2} \right) \right| + (\pi - 2\beta_0) \cos \beta \right]}{\pi L (\pi - 2\beta_0 - \sin 2\beta_0)}, \quad (2)$$

где N – равнодействующая нормальная сила на заданной поверхности.

При некотором значении $\beta = \beta_m$ давление p будет максимальным. Значение β_m может быть получено путем дифференцирования выражения (2) из условия $dp/d\beta = 0$, что обеспечивается соотношением:

$$\ln \left| \sin(\beta_m + \beta_0) / \sin(\beta_m - \beta_0) \right| = (\pi - 2\beta_0) \operatorname{tg} \beta_m. \quad (3)$$

При известном значении β_0 может быть определено значение β_m . В большинстве случаев значение β_0 неизвестно и требует специальных методов расчета. Методика одновременного определения как β_0 , так и β_m заключается в следующем. Путем подстановки в выражение (2) β_m вместо β определяется максимальное значение нормального давления на поверхности контакта p_m . С другой стороны максимальное значение p_m имеет место в точке перехода заданной поверхности в переднюю, где удовлетворяется условие пластичности и, следовательно, p_m связано с сопротивлением обрабатываемого материала сдвигу в условиях резания – τ_s и коэффициентом трения по заданной поверхности лезвия μ . Согласно [1], эта связь имеет вид: $\tau_s = 2(0,25 + \mu^2) p_m / \sqrt{3}$.

Отсюда может быть получено следующее выражение:

$$BL / \left((1 - \mu_1^2) / E_1 + (1 - \mu_2^2) / E_2 \right) = \frac{\tau_s \pi \sqrt{3} (0,25 + \mu^2)^{-1}}{\sin \beta_m \ln \left| \frac{\sin(\beta_m + \beta_0)}{\sin(\beta_m - \beta_0)} \right| + \sin \beta_0 \ln \left| \operatorname{tg} \left(\frac{\beta_m + \beta_0}{2} \right) \operatorname{tg} \left(\frac{\beta_m - \beta_0}{2} \right) \right| + (\pi - 2\beta_0) \cos \beta_m}, \quad (4)$$

где μ_1, E_1 – упругие константы обрабатываемого материала; μ_2, E_2 – упругие константы материала инструмента; B – кривизна краев фаски износа задней поверхности, $B = 1/r$; τ_s – предел текучести на сдвиг обрабатываемого материала.

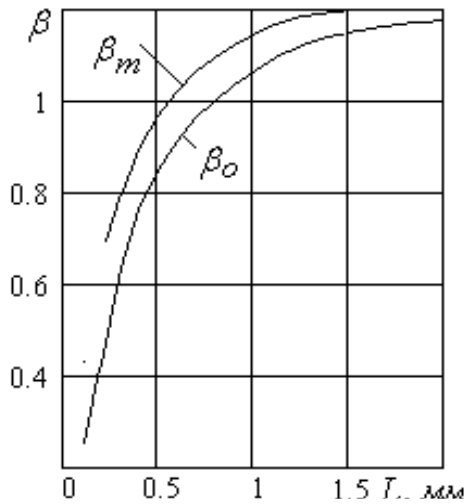


Рис. 2. Графики зависимости параметров β_0 и β_m от величины фаски износа L

Значения углов β_0 и β_m определяются из совместного решения уравнений (3) и (4). Получение решения в аналитическом виде весьма затруднительно, в связи с чем используются численные методы расчета.

В результате решения указанной системы уравнений установлена зависимость параметров β_0 и β_m от величины фаски износа L , представленная на рис. 2. Расчеты выполнены для условий обработки конструкционных сталей твердосплавными инструментами (принятые параметры: $\tau_s = 450$ МПа; $\mu_1 = 0,25$; $E_1 = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; $\mu_2 = 0,25$; $E_{2mc} = 5,0 \cdot 10^5$ МПа; $\mu = 0,5$; $B = 0,1$). Из графиков следует, что с увеличением износа параметры β_0 и β_m увеличиваются, причем их наиболее интенсивный рост наблюдается в области малых значений износа. Зная β_0 и β_m , можно определить нормальную силу на задней поверхности N для любых значений износа [1]:

$$N = \frac{0,25b\tau_s \pi \sqrt{3} L (\pi - 2\beta_0 - \sin 2\beta_0) (0,25 + \mu^2)^{-1}}{\sin \beta_m \ln \left| \frac{\sin(\beta_m + \beta_0)}{\sin(\beta_m - \beta_0)} \right| + \sin \beta_0 \ln \left| \operatorname{tg} \left(\frac{\beta_m + \beta_0}{2} \right) \operatorname{tg} \left(\frac{\beta_m - \beta_0}{2} \right) \right| + (\pi - 2\beta_0) \cos \beta_m}, \quad (5)$$

где b – длина контакта задней поверхности с обрабатываемым материалом или ширина среза.

Для расчета нормальной силы на задней поверхности N целесообразно установить закономерности изменения безразмерного коэффициента K , входящего в формулу расчета (5), зависящего только от параметров β_0 и β_m :

$$K_T = \frac{(\pi - 2\beta_0 - \sin 2\beta_0)}{\sin \beta_m \ln \left| \frac{\sin(\beta_m + \beta_0)}{\sin(\beta_m - \beta_0)} \right| + \sin \beta_0 \ln \left| \operatorname{tg} \left(\frac{\beta_m + \beta_0}{2} \right) \operatorname{tg} \left(\frac{\beta_m - \beta_0}{2} \right) \right| + (\pi - 2\beta_0) \cos \beta_m}. \quad (6)$$

График изменения безразмерного коэффициента K_T , теоретически рассчитанного по формуле (6) в зависимости от величины фаски износа L с учетом соответствующего изменения параметров β_0 и β_m , представлен на рис.3.

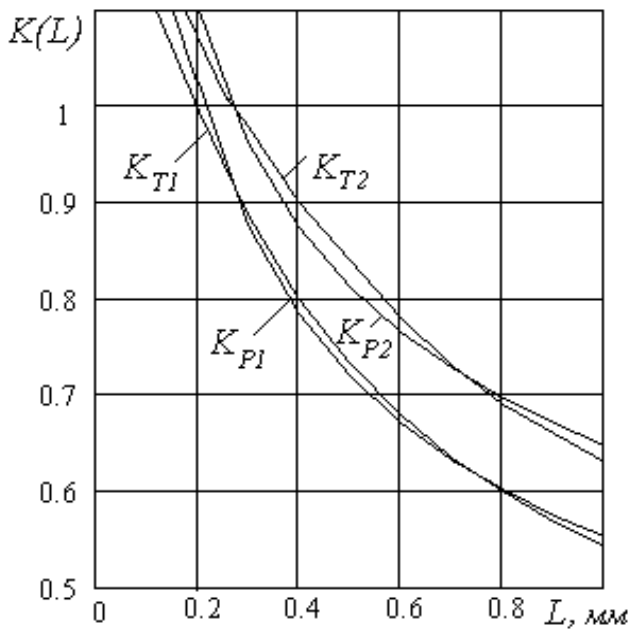


Рис. 3. Графики зависимости коэффициента K от величины фаски износа L для инструментов, оснащенных твердым сплавом – 1 и быстрорежущей сталью – 2

оснащенных твердым сплавом и быстрорежущей сталью, может быть выражена следующими зависимостями:

$$K_{P1} = 0.55L^{-0.38}; \quad K_{P2} = 0.65L^{-0.33} \quad (7)$$

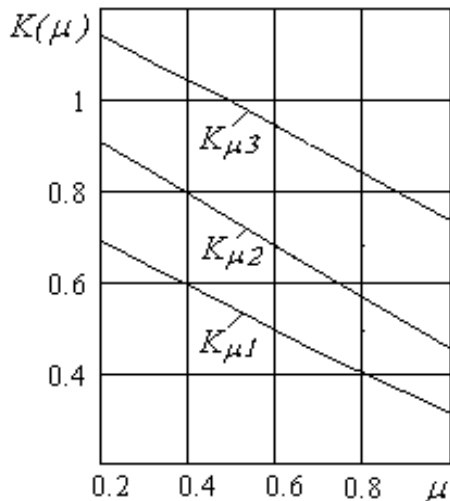


Рис. 4. Графики зависимости коэффициента K от величины коэффициента трения μ при различных значениях износа h

С достаточной точностью (до 5%) взаимосвязь коэффициентов $K(\mu)$ с величиной коэффициента трения μ может быть выражена следующими зависимостями:

При расчетах учтено различие в свойствах различных инструментальных материалов: модуль упругости для быстрорежущих сталей $E_{2\sigma p} = 2,1 \cdot 10^5$ МПа отличается от модуля упругости для твердых сплавов, вследствие чего изменяются параметры β_0 и β_m , а следовательно и коэффициенты K_T . Графики зависимости коэффициента K_T от величины фаски износа L для инструментов, оснащенных твердым сплавом K_{T1} и быстрорежущей сталью K_{T2} , представлены на рис. 3.

Для практического использования целесообразно, пользуясь методикой регрессионного анализа, упростить выражение (6). С достаточной точностью (до 5%) взаимосвязь коэффициентов K_{P1} и K_{P2} с величиной фаски износа по задней поверхности L для инструментов,

Графики зависимости коэффициентов K_{P1} и K_{P2} от величины фаски износа L , также представленные на рис. 3, достаточно близки к графикам K_{T1} и K_{T2} . Графики свидетельствуют о том, что с увеличением фаски износа по задней поверхности коэффициент $K(L)$ снижается.

В результате исследований установлено, что параметры β_0 и β_m зависят от коэффициента трения по задней поверхности лезвия μ , вследствие чего изменяется и коэффициент K_T , рассчитываемый по формуле (6). Графики зависимости коэффициента $K(\mu)$ от величины коэффициента трения μ для инструментов, оснащенных твердым сплавом, при различных значениях износа h ($K_{\mu 1} - h_1 = 1$ мм, $K_{\mu 2} - h_2 = 0,5$ мм, $K_{\mu 3} - h_3 = 0,2$ мм) представлены на рис. 4. Из графиков следует, что с увеличением коэффициента трения μ коэффициент $K(\mu)$ снижается для всех значений износа.

$$K_{\mu 1} = 1,6 - 2\mu ; \quad K_{\mu 2} = 1,8 - 1,7\mu ; \quad K_{\mu 3} = 2,6 - 2\mu . \quad (8)$$

На основании выполненных исследований зависимость для расчета нормальной силы на задней поверхности N_p , с учетом соответствующих условий для определения коэффициента K_T по (7) и (8), может быть выражена следующим образом:

$$N_p = 1,36b\tau_s (0,25 + \mu^2)^{-1} K_T . \quad (9)$$

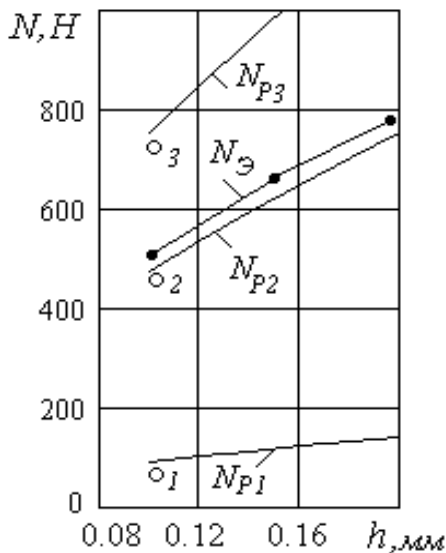


Рис. 5. Графики зависимости нормальной силы на задней поверхности лезвия N от износа h при различных коэффициентах трения μ

Адекватность полученной зависимости подтверждена результатами экспериментальных исследований, представленных в работе [1]. Условия проведения экспериментальных исследований и расчетов: обрабатываемый материал – сталь 20X; $\tau_s = 380$ МПа; $\mu_1 = 0,25$; $E_1 = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; инструментальный материал – быстрорежущая сталь; ширина среза $b = 10$ мм; скорость резания $V = 0,7$ м/мин. Результаты экспериментов по влиянию износа h на нормальную силу на задней поверхности N , представленные графиком $N_{\text{э}}$ для коэффициента трения $\mu = 0,35$, достаточно хорошо (погрешность не превышает 10 %) совпадают с рассчитанным для тех же условий графиком N_{P1} на рис. 5. Результаты экспериментов по определению нормальной силы N при износе $h = 0,1$ мм для различных коэффициентов трения μ , представленные на рис. 5 точками 1, 2, 3 (соответственно $\mu_1 = 1,9$, $\mu_2 = 0,35$, $\mu_3 = 0,1$), также хорошо совпадают с расчетными значениями на графиках N_{P1} , N_{P2} , N_{P3} . Результаты сравнения подтверждают возможность использования полученных зависимостей для расчета сил на задней поверхности лезвия инструмента.

Заключение

Таким образом, в результате исследований закономерностей формирования сил на задней поверхности лезвия инструмента разработана и экспериментально подтверждена методика их расчета, содержащая в удобном для практического применения виде поправочные коэффициенты для учета различных условий механической обработки. Методика может быть использована для прогнозирования сил резания в зависимости от величины износа задней поверхности лезвия инструмента и обоснования силовых критериев затупления инструмента при различных видах обработки.

Список литературы: 1. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. – М.: Машгиз, 1956. – 366 с. 2. Развитие науки о резании металлов. – М.: Машиностроение, 1967. – 416 с. 3. Струтинський В.Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки. Житомир: ЖІТІ, 2001. – 612с. 4. Петраков Ю.В. Моделирование процессов обработки резанием // Сучасні технології машинобудування: Збірник наукових статей/ За заг. ред. А.І. Грабченка. В 2-х т. – Харків: НТУ «ХПІ», 2006. Т. 2. – С. 221 - 232. 5. Татяниченко А.Г., Малышко И.А. Определение контактных усилий по задней поверхности инструмента при развертывании// Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Международный сборник научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2002. –

Вып. 19. – С. 239-245.

АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛ НА ЗАДНІЙ ПОВЕРХНІ ЛЕЗА
РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ

Івченко Т.Г.

На підставі дослідження закономірностей формування сил на задній поверхні леза інструменту розроблена аналітична методика їх розрахунку. У зручному для практичного застосування вигляді представлені коефіцієнти, що враховують величину зносу і коефіцієнт тертя на задній поверхні леза. Достовірність отриманих результатів і можливість їх використання для розрахунку сил на задній поверхні леза інструменту підтверджена експериментально.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛ НА ЗАДНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ
ЛЕЗВИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Ивченко Т.Г.

На основании исследования закономерностей формирования сил на задней поверхности лезвия инструмента разработана аналитическая методика их расчета. В удобном для практического применения виде представлены коэффициенты, учитывающие величину износа и коэффициент трения на задней поверхности лезвия. Достоверность полученных результатов и возможность их использования для расчета сил на задней поверхности лезвия инструмента подтверждена экспериментально.

ANALYTICAL RESEARCHES OF FORCES ON THE BACK SURFACE
OF THE CUTTING TOOL BLADE

Ivchenko T.G.

On the basis of research of conformities to the law of forming of forces on the back surface of blade of instrument the analytical method of their calculation is developed. Coefficients taking into account the size of wear and coefficient of friction on the back surface of blade are presented in a comfortable for practical application kind. Authenticity of the got results and possibility of their use the got results for the calculation of forces on the back surface of blade of instrument are confirmed experimentally.

Рецензент: д.т.н., проф. Матюха П.Г.