

М.М. СИМОНЯН

**РАСЧЕТ ДЕЙСТВУЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ В КОНТАКТНОЙ ЗОНЕ
РЕЖУЩЕГО ТВЕРДОСПЛАВНОГО КЛИНА С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ
НАГРУЖЕНИЯ ПРИ ПРЕРЫВИСТОМ РЕЗАНИИ**

Исследованы вопросы прочности твердосплавного инструмента в контактной зоне режущего клина при прерывистом резании. При оценке хрупкой прочности режущего клина твердосплавная пластина рассматривалась как балка на упругом основании. Расчет прочности клина произведен для случаев распределения контактных нагрузок по прямоугольному и треугольному законам.

Ключевые слова: прочность, режущий клин, твердосплавная пластина, прерывистое резание, контактная нагрузка.

Известно, что при расчете действующих напряжений в контактной зоне, согласно принципу Сен-Венана, необходимо учитывать характер (закон) распределения нагрузок [1]. Определение характера распределения действующих нагрузок в контактной зоне представляет сложную техническую задачу. При исследовании напряжений деформированного состояния и выявлении характера распределения напряжений в контактной зоне области резания наглядным примером является поляризационно-оптический метод (метод динамической фотоупругости), но материал инструмента, используемого при этом и проявляющего при нагружении оптическую анизотропию, пригоден лишь для моделирования процесса резания на малых скоростях и низких температурах режущей части клина [1,2].

При обработке пластичных материалов резанием контуры деформируемой области и напряженное состояние во всех точках зоны резания, в том числе и в зоне контакта стружки с резцом, остаются практически неизменными во времени. Это дает основание с достаточно хорошим приближением рассматривать задачу о взаимодействии стружки с резцом как статическую задачу о контакте двух тел [2]. Одно из этих тел (резец) остается упруго-напряженным во всех точках. Другое тело содержит пластическую область, контуры которой зависят от напряженного состояния и, следовательно, подлежат определению. В такой постановке рассматриваемая задача относится к упруго-пластическим задачам механики сплошной среды, которые являются наиболее трудными и решаются лишь для простейших случаев [3]. По сравнению с упруго-напряженной областью, размеры контактной пластической области в стружке не велики и убывают с повышением скорости резания. Необходимо учесть также, что в пределах пластического кон-

такта передвижение стружки происходит не по передней поверхности, а по заторможенному слою, и сопротивление движению стружки определяется сопротивлением сдвигу в ее контактной зоне. На этом участке внешнее трение скольжения заменяется “внутренним” трением между отдельными слоями стружки. Экспериментальные исследования показывают, что коэффициент трения по длине контакта не постоянен, а возрастает по направлению от режущей кромки к точке, в которой стружка покидает резец. Однако влияние изменения коэффициента трения в практических расчетах можно не учитывать [1]. В случае резания контуры деформируемой области и другие граничные условия весьма сложны, что делает невозможным строгое решение математической задачи о взаимодействии стружки с резцом и заставляет искать пути ее упрощения. К примеру, одним из путей может быть решение рассматриваемой задачи методами теории упругости в предположении, что пластическая область в зоне резания пренебрежимо мала и не оказывает влияния на напряженное состояние. В теоретических исследованиях разных авторов эти методы используются даже для определения положения пластических сдвигов при стружкообразовании. Поэтому, если исследовать область около контактной зоны, то взаимодействие стружки с резцом можно рассматривать как соприкосновение двух упругих тел, осложненное появлением небольшой контактной пластической области. Решение подобной задачи методами теории упругости в качестве первого приближения вполне оправданно [3].

Важно также отметить, что формы эпюр контактных напряжений вблизи режущей кромки сильно различаются, где из-за отсутствия надежных данных полученные результаты противоречивы, и влияние внешних факторов (материала и геометрических параметров резца, элементов режима резания и др.) на форму эпюр контактных напряжений – самостоятельный и малоизученный вопрос. Имеющийся экспериментальный материал не позволяет дать на него исчерпывающий ответ, но достаточен, чтобы оценить, пусть не совсем точно, влияние основных факторов [3]. В технической литературе высказываются мнения, что эпюры контактных нормальных напряжений, действующих на переднюю поверхность, могут быть прямоугольными, треугольными, трапецидальными, параболическими и т.п. [1,2,7].

Величины напряжений, действующие в процессе резания, в большей степени зависят от способа крепления пластины на опорной поверхности. Изгиб пластины вместе с корпусом и относительно последнего существенно не влияет на сжимающие напряжения, возникающие в контактной зоне. Поэтому представление о рабочей части инструмента как о полубесконечном клине из однородного материала [4] правомочно при определении напряжений в этой зоне. Оно допустимо также при изучении прочности режущей части в опасном сечении. При этом для анализа разрушений пластины и деформации опорной зоны инструмента необходимо учитывать, что инструмент является составным телом при

разности в модулях упругости пластин и корпуса, а пластину из твердого сплава можно рассматривать как пластину на упругом основании с защемленным концом [4]. Зону стружкообразования, переходящую в стружку с упрочнением, можно рассматривать как одну опору, а ее продолжение, контактирующее с передней поверхностью пластины и создающее давление на нее, - как полубесконечную упругую полосу, опирающуюся на упругое основание, и при этом напряжения распределяются по некоторому закону.

Расчет нормальных напряжений от изгиба твердосплавной пластины в контактной зоне во время первоначального контакта инструмента с заготовкой при работе острым инструментом производился в предположении, что прямоугольная пластина или балка закреплена по всей длине на сплошном упругом основании, которое при изгибе пластины будет оказывать на нее давление посредством распределенных реактивных сил, величины которых в каждом сечении стержня будут пропорциональны прогибу пластины. Эти реактивные силы, действующие на единицу длины, обозначим через $k \cdot y$, где y – прогиб, а k – коэффициент упругости основания и представляет реактивную силу на единицу длины пластины при прогибе, равном единице. Предположение, что реактивные силы упругого основания пропорциональны прогибам, освобождает от дополнительных трудностей и для решения подобных задач является вполне достаточным [5,6].

Для расчета хрупкой прочности режущего клина проведен ряд экспериментов на трех материалах: сталь 40Х, сталь 45 и железо Армко, при неизменных геометрических параметрах резца, армированного твердосплавной пластиной Т5К10 ($\gamma = 12^\circ, \alpha = 6^\circ, \varphi = 60^\circ, \varphi_0 = 20^\circ, \lambda = 0^\circ$).

Рассмотрим случай, когда пластина на опорной поверхности плотно закреплена на упругом основании и частично - на длине l_k (длина контакта) нагружена распределенной нагрузкой (рис. 1).

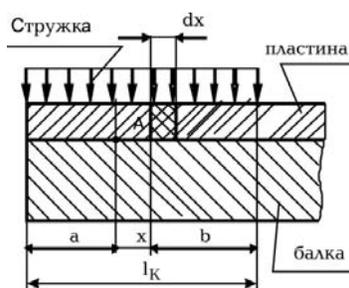


Рис. 1. Пластина на упругом основании

Имея закон распределения контактных давлений по передней поверхности инструмента, вышеизложенным методом можем найти величины прогибов и

изгибающих напряжений в любой точке. Наибольшее напряжение изгиба пластины в контактной зоне при прямоугольном распределении нагрузок будет [6]:

$$\sigma_{max} = \frac{3\sigma_c \cdot b_k \cdot l_k}{2bh^2} \sqrt{\frac{4EI}{k}} \quad \text{или} \quad \sigma_{max} = \frac{3\sigma_c \cdot b_k \cdot l_k}{2bh^2} \xi, \quad (1)$$

где $\xi = \sqrt{\frac{4EI}{k}}$; E – модуль упругости пластины; I – момент инерции сечения пластины в контактной зоне; h – толщина пластины.

Формула (1) через коэффициент k отражает влияние модулей упругости и моментов инерции элементов рабочей части резца. Важно отметить, что вблизи точек приложения силы или распределенной нагрузки закон распределения нормальных напряжений в поперечных сечениях балки от действия изгибающего момента будет более сложным, т.к. в контактных площадках возникают местные напряжения. Точное решение задачи показывает, что напряжения в какой-либо точке A направлены по радиусу, соединяющему точку A с точкой O , и являются напряжениями сжатия, величины которых можно вычислить по зависимости [5]

$$\sigma_r = \frac{2P}{\pi \times t} \cdot \frac{\cos\theta}{r}, \quad (2)$$

где r – расстояние рассматриваемой точки от точки приложения силы (рис. 2); t – ширина балки; θ – угол, составляемый радиусом и направлением силы P . При точном решении задачи к этим напряжениям должны прибавляться расчетные нормальные напряжения. При изгибе балок распределенной нагрузкой (рис. 3) разница между обычной формулой для напряжений и точным решением объясняется тем, что нагрузка прижимает продольные сечения друг к другу.

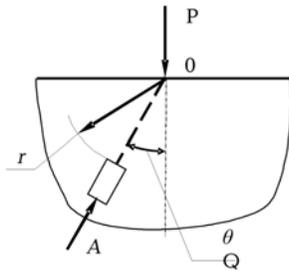


Рис. 2. Схема определения местных напряжений

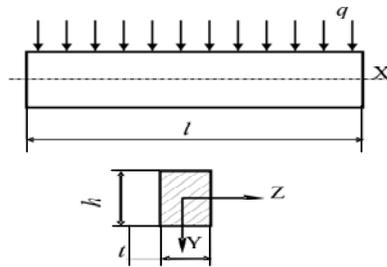


Рис. 3. К точному решению изгиба балки под действием распределенной нагрузки

Поправка к формуле (2), учитывающей местные напряжения при изгибе балки распределенной нагрузкой, определяется из следующего уравнения:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_c}{2I} \left(\frac{h^2}{10} y - \frac{2}{3} y^3 \right). \quad (3)$$

Как видно из зависимостей (2) и (3), при изгибе балок сосредоточенной силой или распределенной нагрузкой поправки, учитывающие местные напряжения, в основном, определяют изменения нормальных напряжений по глубине. При определении нормальных напряжений в контактных слоях эти поправки можно не учитывать [5], и расчет напряжений, возникающих в этих слоях при изгибе балок, находящихся на упругом основании, можно с достаточной точностью выполнить с помощью уравнения (1).

В табл. 1 приведены значения динамических напряжений с учетом силы удара [8]. Величины, необходимые при расчете максимальных динамических изгибающих напряжений, были определены по методикам и формулам, приведенным в [1,2,7].

Таблица 1

Расчетные данные для оценки прочности инструмента в контактной зоне
(прямоугольное распределение)

Расчетные элементы	Обрабатываемый материал		
	Сталь 40Х	Сталь 45	Железо Армко
$V, \text{ м/мин}$	48	48	48
$a, \text{ мм}$	0,433	0,433	0,433
$b, \text{ мм}$	1,7	1,7	1,7
$h, \text{ мм}$	7	7	7
$\sigma_c, \text{ кг/мм}^2$	56,25	41,65	29,79
$K, \text{ кг/мм}^2$	421,4	421,4	421,4
$[\sigma_{\text{вр}}]_{\text{T15K6}}, \text{ кг/мм}^2$	72,52	72,52	72,52
$[\sigma_{\text{изд}}]_{\text{T15K6}}, \text{ кг/мм}^2$	117,6	117,6	117,6
$E_{\text{T15K6}}, \text{ кг/мм}^2$	$4,1 \times 10^4$	$4,1 \times 10^4$	$4,1 \times 10^4$
$\sigma_{\text{изд}}, \text{ кг/мм}^2$	30,68	31,5	40,65
Вылет резца, $l_p, \text{ мм}$	50	50	50
$b \times h, \text{ мм}$	20 x 30	20 x 30	20 x 30
$K_{\text{АЭИ}}$	1,62	1,82	1,76
$\sigma_{\text{изг.дин}} / [\sigma_{\text{изг}}]_{\text{T15K6}}$	0,26	0,27	0,35

Коэффициент упругости основания (табл. 1) определяется следующим образом:

$$K = \frac{P}{\delta \cdot l}, \quad (4)$$

где P – нагрузка, приложенная к вершине резца; δ – упругое перемещение вершины резца под воздействием нагрузки; l – вылет резца. В нашем случае $K = 4,21 \cdot 10^2 \text{ кг/мм}^2$.

Определим нормальное напряжение от изгиба твердосплавной пластины в контактной зоне при врезании инструмента в обрабатываемый материал и распределении контактных нормальных напряжений по треугольной эпюре, часто применяемой для решения контактных задач [1,7] (рис. 4). Элементарная нагрузка на длине пластинки будет $\sigma_N \cdot x dx / l_k$. Общая нагрузка на длине l_k при треугольном распределении нагрузок определяется из выражения

$$\sigma = \int_0^{l_k} \sigma_N \cdot \frac{x dx}{l_k} = \frac{\sigma_N \cdot l_k}{2}$$

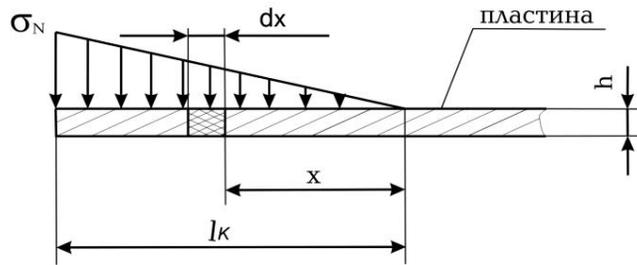


Рис. 4. Распределение контактных нормальных напряжений на длине контакта при треугольной эпюре

Для одной и той же нормальной силы, действующей на переднюю поверхность, с достаточной точностью можно принять, что площади прямоугольной и треугольной эпюр равны [1], т.е. $\sigma_c \cdot l_k = \sigma_N \cdot \frac{l_k}{2}$, $\sigma_N = 2\sigma_c$.

В табл. 2 приведены результаты расчета максимальных динамических изгибающих напряжений в контактной зоне для различных материалов при условии распределения контактных нормальных напряжений по треугольной эпюре.

Таблица 2

Расчетные данные для оценки прочности инструмента в контактной зоне
(треугольное распределение)

Расчетные элементы	Обрабатываемый материал		
	Сталь 40Х	Сталь 45	Железо Армко
$V, \text{ м/мин}$	0,433	0,433	0,433
$a, \text{ мм}$	1,7	1,7	1,7
$b, \text{ мм}$	7	7	7
$h, \text{ мм}$	56,25	41,65	29,79
$\sigma_c, \text{ кг/мм}^2$	421,4	421,4	421,4
$K, \text{ кг/мм}^2$	72,52	72,52	72,52
$[\sigma_{\text{вр}}]_{\text{T15K6}}, \text{ кг/мм}^2$	117,6	117,6	117,6
$[\sigma_{\text{изд}}]_{\text{T15K6}}, \text{ кг/мм}^2$	$4,1 \times 10^4$	$4,1 \times 10^4$	$4,1 \times 10^4$
$E_{\text{T15K6}}, \text{ кг/мм}^2$	38,2	34,6	48,4
$\sigma_{\text{изд}}, \text{ кг/мм}^2$	50	50	50
Вылет резца, $l_p, \text{ мм}$	20 x 30	20 x 30	20 x 30
$b \times h, \text{ мм}$	1,60	1,82	1,68
$K_{\text{АБГ}}$	61,12	63,0	81,31
$\sigma_{\text{изг.дин}} / [\sigma_{\text{изг.}}]_{\text{T15K6}}$	0,52	0,54	0,70

Результаты, приведенные в табл. 1 и 2, показывают, что динамические напряжения, возникающие вследствие изгиба твердосплавной пластины в контактной зоне при начальном контакте режущего клина с заготовкой, рассчитанные для условий распределения контактных нормальных напряжений по равномерной и треугольной эпюрам, не превышают допустимого значения для инструментального материала. Следует отметить, что наибольшее значение динамических контактных изгибающих напряжений имеет место при треугольной эпюре контактных нормальных напряжений, действующих на переднюю поверхность,

Полученные результаты хорошо согласуются с результатами, приведенными в [1]. Однако из литературных источников и из практики эксплуатации твердосплавных инструментов при прерывистом резании известно немало случаев хрупкого разрушения твердосплавной пластины в контактной зоне.

Анализ полученных нами математических моделей показывает, что сила удара в процессе врезания достигает максимума до того, как деформация в зоне контакта станет максимальной [9]. Из изложенного следует, что при определенных режимах прерывистой обработки хрупкое разрушение от ударных нагрузок может иметь место и в контактной зоне, которому будут способствовать “всплеск”

силы удара при врезании и задержка увеличения сечения среза на передней поверхности клина в переходном периоде [9,10]. Совместное влияние этих факторов может привести к кратковременному “всплеску” действующих контактных напряжений. Этому могут способствовать также растягивающие термические напряжения, возникающие во время холостого хода твердосплавного инструмента [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бетанели А.И.** Прочность и надежность режущего инструмента.- Тбилиси: Сабчота Сакартвело,1973. – 304 с.
2. **Бобров В.Ф.** Основы теории резания металлов.- М.: Машиностроение, 1995. – 138 с.
3. **Полетика М.Ф.** Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента. - М.: Машиностроение, 1969. - 148 с.
4. **Хаег Г.Л.** Прочность режущего инструмента.- М.: Машиностроение, 1975. – 166 с.
5. **Тимошенко С.П., Лесселье Дж.** Прикладная теория упругости.- М.: Физматгиз, 1975. – 575 с.
6. **Касьян М.В., Симонян М.М.** Оценка хрупкой прочности твердосплавного инструмента в условиях прерывистого резания // Изв. АН АрмССР. Сер. ТН. - 1980. – Т. XXXIII, № 3.– С. 3 - 6.
7. **Лоладзе Т.Н.** Прочность и износостойкость режущего инструмента. - М.: Машиностроение, 1982. – 320с.
8. **Симонян М.М., Балаян В.А., Кочарян К.С.** Влияние адгезии на работоспособность твердосплавного инструмента при выходе из зоны резания с нулевой толщиной среза // Вестник машиностроения.- М., 2010. - №9. – С. 62-64.
9. **Симонян М.М.** О некоторых явлениях переходного периода процесса прерывистого резания при врезании инструмента в заготовку // Вестник машиностроения.- М., 2005. - № 10. –С. 50 - 52.
10. **Симонян М.М.** Исследование динамики силового и теплового воздействий на твердосплавный инструмент при прерывистом резании // Вестник машиностроения.- М., 2004.- № 12. – С. 54 - 56.

Ванадзорский филиал ГИУА (ПОЛИТЕХНИК). Материал поступил в редакцию 06.12.2011.

Մ.Մ. ՄԻՄՈՆՅԱՆ

ԸՆԴՀԱՏ ԿՏՐՄԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿ ԿԱՐԾՐ ՀԱՄԱՁՈՒՎԱԾՔԵ ԿՏՐՈՂ ՍԵՊԻ ՎՐԱ
ԱԶԴՈՂ ԼԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ՀԱՇՎԱՐԿԸ ԿՏՐՄԱՆ ԳՈՏՈՒՄ ԴԻՆԱՄԻԿ ԲԵՌՆՄԱՆ
ՀԱՇՎԱՌՈՒՄՈՎ

Դիտարկված են ընդհատ կտրման ժամանակ գործիքի կտրող սեպի հպման գոտում ամրության հետ կապված հարցեր: Կտրող սեպի փխրամրության գնահատման ժամանակ կարծր համաձուլվածքե թիթեղը դիտարկվել է որպես առաձգական հենարանի վրա տեղադրված հեծան: Սեպի ամրության հաշվարկը կատարված է կոնտակտային բեռնվածությունների ուղղանկյուն և եռանկյուն օրենքներով բաշխումների դեպքերի համար:

Առանցքային բառեր. ամրություն, կտրող սեպ, կարծր համաձուլվածքե թիթեղ, ընդհատ կտրում, կոնտակտային բեռնվածություն:

M.M. SIMONYAN

CALCULATION OF ACTIVE TENSION IN CONTACT AREA OF THE
HARDMETAL CUTTING WEDGE IN CONSIDERATION OF THE LOAD
DYNAMICS IN THE PROCESS OF INTERRUPTED CUTTING

Problems concerning the toughness of hardmetal instrument in the contact area of the cutting wedge in the process of interrupted cutting are discussed. During the assessment of brittle strength of the cutting wedge the hardmetal plate was viewed as a bar on elastic foundation. The toughness of the wedge is calculated for cases of contact load distributions due to rectangle and triangle laws.

Keywords: toughness, cutting wedge, hardmetal plate, interrupted cutting, contact load.