

# Исследование процессов обработки

УДК 621.941

Л. Н. Девин, А. Г. Сулима (г. Киев)

## **Особенности процесса резания на первом и последнем обороте детали при входе и выходе резца**

*Описан метод расчета напряжений в резце при его врезании и выходе из детали. Установлено, что в течение первого и последнего оборотов детали передний угол инструмента существенно отличается от значений характерных для стационарного течения. Изменения переднего угла влияют на величину и знак напряжений на передней и задней поверхностях резца, а его учет позволяет рассчитывать напряжения и в дальнейшем оценивать вероятность разрушения инструмента.*

**Ключевые слова:** врезание и выход инструмента, расчет напряжений, округление режущей кромки, передний угол, усадка стружки, круглая алмазно-твердосплавная пластина.

Одним из видов нестационарного процесса обработки является резание в период врезания и выхода инструмента из заготовки. Сложность исследования процесса резания на указанных этапах обработки заключается в их быстротечности, а также в том, что претерпевают изменение многие параметры, которые характеризуют процесс снятия стружки — глубина, скорость резания, усадка стружки и др. Более того, геометрические параметры режущей кромки также изменяются в связи с тем, что радиус округления режущей кромки сравним с глубиной резания на этапах врезания в течение первого оборота, а при выходе режущего инструмента — на последнем обороте.

При обработке поршней двигателей внутреннего сгорания (ДВС) из сплавов алюминия применяют резцы, оснащенные алмазно-твердосплавными пластинами (АТП). На заводах по обработке поршней ДВС установлено, что основными видами разрушения таких инструментов являются сколы вершины резцов. Это связано с тем, что в моменты врезания и выхода резца из детали сила прикладывается к небольшому участку в вершине резца и резко изменяется, тем самым приводит к значительному изменению уровня и знака напряжений на поверхностях инструмента.

При массовом производстве поршней ДВС время обработки одного поршня невелико, однако за период стойкости инструмент обрабатывает 4—5 тыс. деталей и знание напряженного состояния инструмента при входе-выходе из

заготовки важно для обеспечения надежности работы резца, а также для управления точностью и качеством изделий.

Цель данной работы — исследовать изменение напряжений на передней и задней поверхностях резца с АТП в момент первого и последнего оборотов детали с учетом изменения площади срезаемого слоя, переднего угла и усадки стружки.

Для выполнения поставленной цели были проведены эксперименты по точению силумина АЛ25 с содержанием кремния до 12 %. Режимы резания: глубина  $t = 0,1—0,5$  мм, подача  $S = 0,1$  мм/об, скорость  $v = 400$  м/мин. Геометрические параметры резца: передний угол  $\gamma = 0^\circ$ , задний  $\alpha = 11^\circ$ , радиус округления режущей кромки  $\rho = 30$  мкм. В результате экспериментов были получены данные об изменении составляющих силы резания. Особое внимание было уделено врезанию и выходу инструмента из детали. Типичный график изменения сил резания приведен на рис. 1.

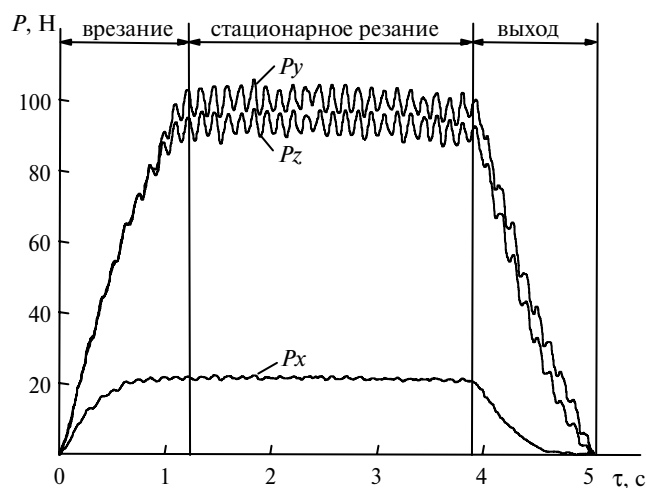


Рис. 1. Пример изменения составляющих силы резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  при точении сплава АЛ25 ( $t = 0,5$  мм,  $S = 0,1$  мм/об,  $v = 400$  м/мин).

Для расчета напряжений в режущем клине использовали аналитическое выражение А. И. Бетанели [1] с изменениями, которые описаны в [2]. Также учли то, что площадь сечения среза, усадка стружки и передний угол на этапах врезания и выхода инструмента изменяются во времени  $\tau$ . В результате преобразований получена зависимость

$$\sigma = \frac{-2P(\tau)}{F(\tau)Bk_0} \left\{ \frac{\cos \left[ \nu_0 - \left( \frac{\beta(\tau)}{2} + \gamma(\tau) \right) \right] \cos \left[ \theta - \left( \frac{\beta(\tau)}{2} + \gamma(\tau) \right) \right]}{\beta(\tau) + \sin(\beta(\tau))} + \frac{\sin \left[ \nu_0 - \left( \frac{\beta(\tau)}{2} + \gamma(\tau) \right) \right] \sin \left[ \theta - \left( \frac{\beta(\tau)}{2} + \gamma(\tau) \right) \right]}{\beta(\tau) - \sin(\beta(\tau))} \right\}, \quad (1)$$

где  $P(\tau)$  — равнодействующая сила резания;  $F(\tau)$  — площадь срезаемого слоя;  $\theta$  — полярная координата с центром на режущей кромке;  $\beta(\tau)$  — угол заострения;  $\gamma(\tau)$  — передний угол;  $k_0$  — коэффициент, определяющий место расположения максимальных напряжений (в соответствии с рекомендациями [3] для передней поверхности принимали  $k_0 = 2$ , а для задней  $k_0 = 1$ );  $\nu_0$  — угол, определяющий направление равнодействующей силы резания;  $B$  — часть формулы полной длины  $s$  контакта стружки с инструментом без толщины  $a$  срезаемого слоя. В нашем случае

$$B = \frac{1,5}{\sin \Phi(\tau) \cdot \sin \left( \frac{\pi}{4} + \Phi(\tau) - \gamma(\tau) \right)},$$

где  $\Phi(\tau)$  — угол сдвига;  $\Phi(\tau) \approx 1/\xi(\tau)$ , где  $\xi(\tau)$  — усадка стружки.

В [4] приведены результаты влияния толщины среза и действительного переднего угла в области малых (соизмеримых с  $\rho$ ) толщин срезаемого слоя на усадку стружки при фрезеровании стали 40. Там же приведены данные об изменении действительного переднего угла  $\gamma_d$  и усадки стружки при глубине резания до 50 мкм. В [4] установлено, что на участке равном величине округления режущей кромки  $\rho$  до 35 мкм  $\gamma_d$  изменяется от  $-50^\circ$  до нуля, а величина усадки стружки — от 6 до 2. При  $\rho > 35$  мкм эти величины имеют постоянное значение. По характеру поведения действительного переднего угла  $\gamma_d$  на участке равном  $\rho$  можно судить о характере изменения усадки стружки  $\xi$ , так как известно, что  $\xi = \left( \frac{\cos \gamma}{\operatorname{tg} \Phi} \right) + \sin \gamma$ , где  $\Phi$  — угол сдвига.

Реальный инструмент даже после доводочных операций имеет конечный радиус округления режущей кромки. В нашем случае  $\rho = 30$  мкм. Способ определения переднего угла показан на рис. 2.

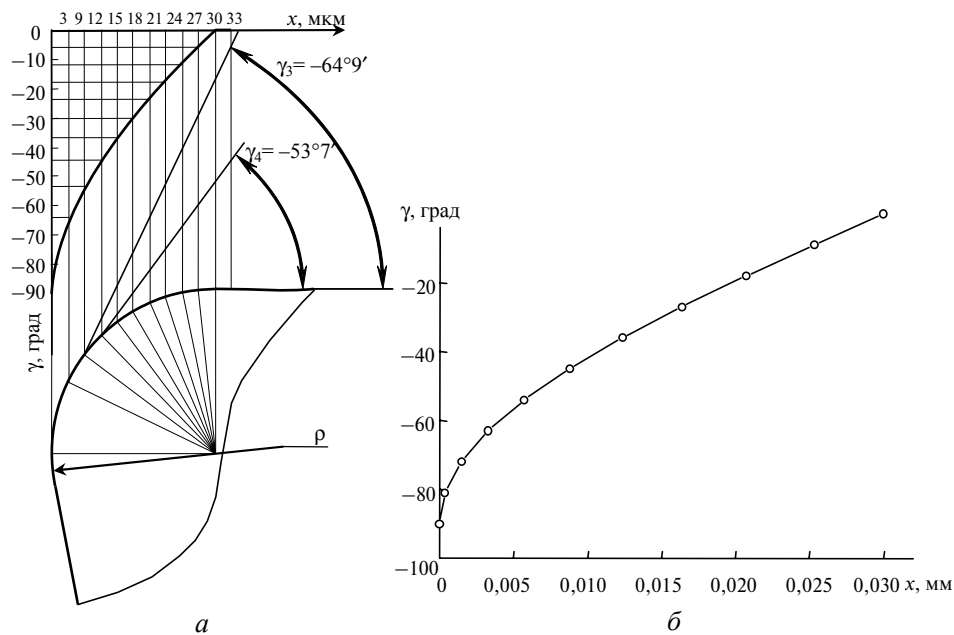


Рис. 2. Определение переднего угла  $\gamma$  на участке  $x \leq \rho$ : геометрические построения (а), график изменения переднего угла (б).

На участке врезания ( $x$  изменяется от нуля до  $\rho$ ) провели ряд геометрических построений (рис. 2, а). По оси  $x$ , которая противоположна направлению подачи, отложили отрезок равный радиусу округления резца и разбили этот отрезок на десять равных частей длиной по 3 мкм. Из конца каждого отрезка опустили луч на округленную кромку резца. Угол в точке касания луча с касательной к режущей кромке и передней поверхностью и есть действительный передний угол в этой точке. Результаты измерений переднего угла  $\gamma$  представлены в табл. 1. Видно, что максимальное приращение угла произошло на отрезке 0—3 мкм и составило  $25^{\circ}50'$ . В момент врезания место касания инструмента и заготовки находится ниже оси центров, а по мере врезания смещается к оси центров. Для оценки влияния данного факта провели расчеты изменения переднего угла вследствие вертикального смещения места касания по формулам, приведенным в [5]. Результаты расчетов переднего установочного угла  $\gamma_y$  приведены в табл. 1. Максимальная погрешность из-за смещения места касания составила 0,015 %, поэтому изменением переднего угла, связанным с вертикальным смещением места касания, можно пренебречь.

**Таблица 1. Изменение действительного переднего угла  $\gamma_d$**

$x$ , мкм	Передний угол $\gamma$	Приращение переднего угла $\gamma$	Установочный передний угол $\gamma_y$
0	$-90^{\circ}$	—	$-89^{\circ}59'$
3	$-64^{\circ}9'$	$25^{\circ}50'$	$-4^{\circ}9'$
6	$-53^{\circ}7'$	$11^{\circ}1'$	$-53^{\circ}7'$
9	$-44^{\circ}25'$	$8^{\circ}42'$	$-44^{\circ}25'$
12	$-36^{\circ}52'$	$7^{\circ}33'$	$-36^{\circ}52'$
15	$-30^{\circ}$	$6^{\circ}52'$	$-30^{\circ}$
18	$-23^{\circ}34'$	$6^{\circ}25'$	$-23^{\circ}34'$
21	$-17^{\circ}27'$	$6^{\circ}7'$	$-17^{\circ}27'$
24	$-11^{\circ}32'$	$5^{\circ}55'$	$-11^{\circ}32'$
27	$-5^{\circ}44'$	$5^{\circ}47'$	$-5^{\circ}44'$
30	$0^{\circ}$	$5^{\circ}44'$	$0^{\circ}$
33	$0^{\circ}$	$0^{\circ}$	$0^{\circ}$

Значение переднего угла  $\gamma$  на участке равном радиусу округления режущей кромки  $\rho$  изменяется от  $-90^{\circ}$  до  $0^{\circ}$ .

Известно [6], что при точении инструментом с округленной режущей кромкой переход от пластического отщеснения обрабатываемого материала к микрорезанию происходит при определенном значении отрицательного переднего угла  $\gamma_k$ , называемого критическим передним углом  $\lambda_k = \arcsin\left(1 - \frac{H}{\rho}\right)$ , где  $H$  — глубина внедрения кромки в обрабатываемый материал. В соответствии с предложенными в [7] допущениями принимаем отношение  $H/\rho$  равным 0,5. Тогда критический передний угла  $\gamma_k$  будет равен  $60^{\circ}$ . Резание начинается тогда, когда  $\gamma \geq \gamma_k$ . Расчет напряжений на этапе врезания проводили с момента, когда передний угол на участке округления ре-

жущей кромки был равен  $60^\circ$ . При выходе инструмента из заготовки напряжения рассчитывали до момента, соответствующего  $\gamma = \gamma_k$ .

Усадку стружки при малых глубинах резания, особенно когда глубина резания соизмерима с радиусом округления режущей кромки, удастся оценить только путем измерения толщины среза на микрошлифах стружки под микроскопом. Применять весовой метод не корректно, так как стружка имеет переменное сечение по длине.

Для оценки влияния усадки стружки и переднего угла  $\gamma$  на напряжения  $\sigma_{Rf}$  на передней и  $\sigma_{Rb}$  на задней поверхностях резца при врезании и выходе из контакта с заготовкой были рассмотрены четыре случая (табл. 2).

**Таблица 2. Параметры моделирования**

№ п/п	Усадка $\xi$	Передний угол $\gamma$
1	const	const
2	$f(\tau)$	const
3	$f(\tau)$	$f(\tau)$
4	const	$f(\tau)$

В первом случае, когда неизвестны законы изменения усадки стружки и переднего угла, а известны только их значения при установившемся процессе резания, допустим, что в момент врезания и выхода усадка и передний угол постоянны. Во втором и четвертом случаях принято, что неизвестен только закон изменения усадки стружки или закон изменения переднего угла  $\gamma$ . Третий случай наиболее сложен для анализа, но он более точно отображает реальную ситуацию при врезании и выходе инструмента.

Изменение напряжений на передней и задней поверхностях инструмента в момент врезания, рассчитанных по формуле (1), для рассматриваемых случаев показано на рис. 3.

Из рис. 3, а, б видно, что наибольшие (по модулю) напряжения на передней поверхности формируются в первом случае, когда усадка  $\xi$  и действительный передний угол  $\gamma_d$  при врезании приняты постоянными. В третьем и четвертом случаях значения напряжений мало отличаются друг от друга, а кривая напряжений 2 занимает промежуточное положение между кривыми 1 и 4.

Из рис. 3, в, г видно, что в первом и втором случаях абсолютные значения напряжений, которые являются растягивающими, близки, а в третьем и четвертом — на задней поверхности возникают сжимающие напряжения. Для инструментов, оснащенных АТП, первый и второй случай наиболее опасны, так как материал АТП имеет низкий предел прочности при растяжении.

Величина и характер изменения напряжений на передней и задней поверхностях резца в момент выхода инструмента из детали показаны на рис. 4.

При выходе инструмента из детали наблюдаются максимальные (по модулю) напряжения в первом случае, а третий и четвертый случаи близки. Во всех четырех случаях наблюдается всплеск напряжений на передней поверхности инструмента по мере его выхода из контакта с заготовкой.

Видно, что на задней поверхности резца напряжения в первом и втором случаях растягивающие, а в третьем и четвертом случае — сжимающие, но средние их значения близки.

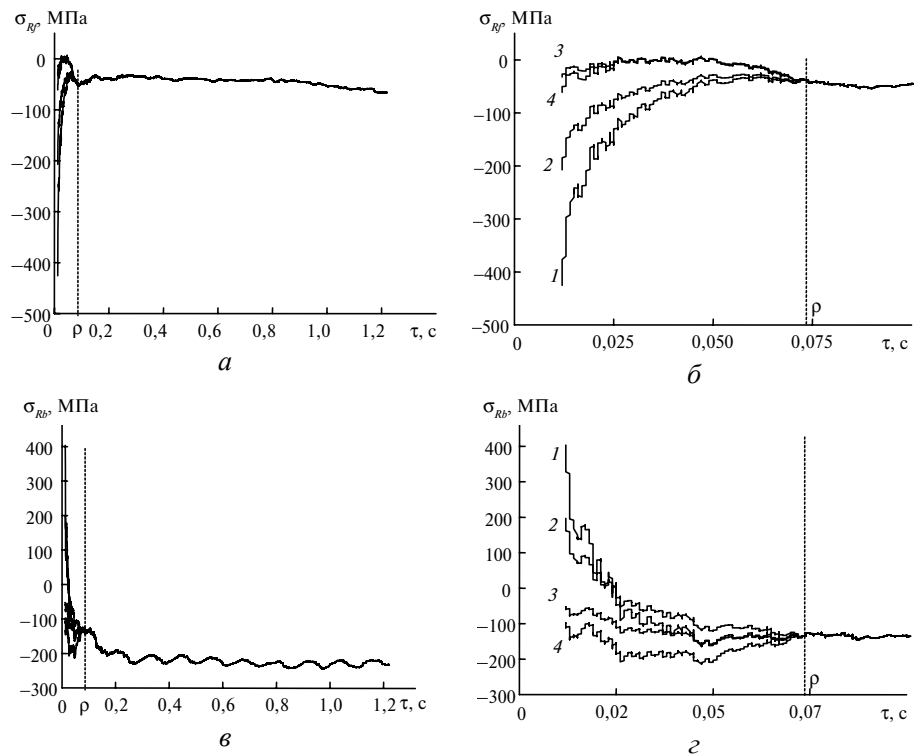


Рис. 3. Напряжения на передней (*а, б*) и задней (*в, г*) поверхностях резца в момент врезания: *а, в* — этап врезания; *б, г* — этап врезания на участке  $\rho$ ; кривые 1—4 — см. табл. 2.

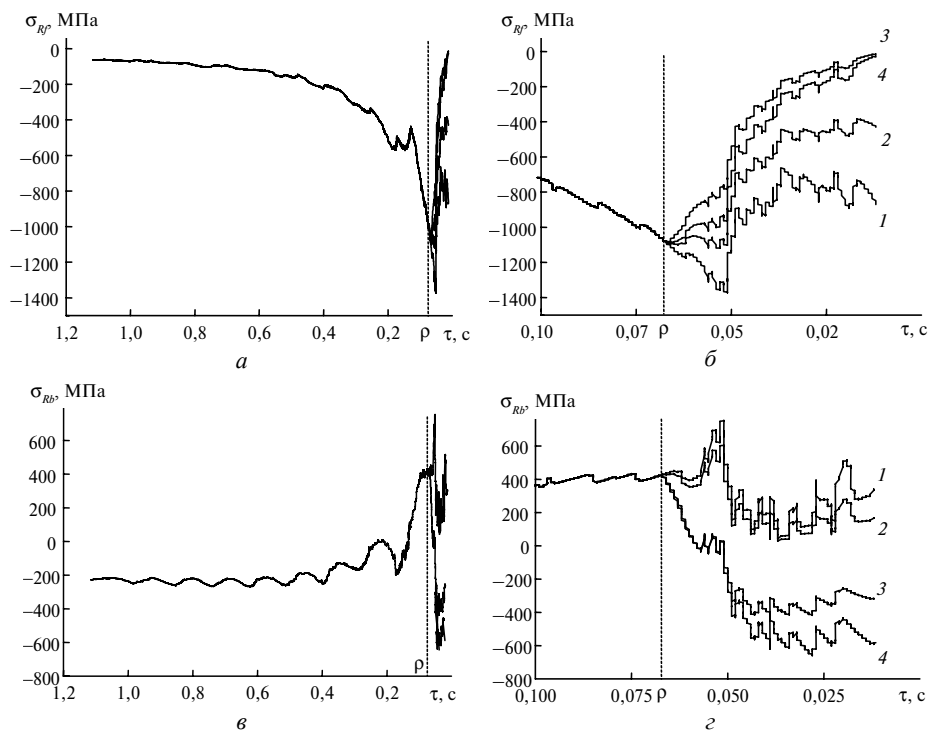


Рис. 4. Напряжения на передней (*а, б*) и задней (*в, г*) поверхностях резца в момент выхода режущего инструмента: *а, в* — этап выхода; *б, г* — этап выхода на участке  $\rho$ ; кривые 1—4 — см. табл. 2.

## ВЫВОДЫ

В работе установлено, что в течение первого и последнего оборотов детали усадка стружки и действительный передний угол существенно отличаются от значений характерных для стационарного точения. Эти изменения в процессе врезания и выхода инструмента из детали существенно влияют на величину и знак напряжений на передней и задней поверхностях резца.

Наибольшее влияние на напряжения на поверхностях резца оказывает действительный передний угол  $\gamma_d$ , который можно определить как функцию координаты в направлении подачи  $S$  в пределах радиуса округления режущей кромки  $r$ .

Учет изменения переднего угла на этапах врезания и выхода позволил рассчитать напряжения на поверхностях резца и оценить вероятность его разрушения. Влияние усадки стружки менее значимо для оценки напряжений, чем действительного переднего угла. Учет изменения усадки для расчета напряжений значительно усложняет расчеты и приводит к уменьшению коэффициента запаса прочности АТП по сжимающим напряжениям, что в производственных условиях нежелательно.

*Описано метод розрахунку напружень у різці при його врізанні й виході з деталі. Встановлено, що протягом першого й останнього обертів деталі передній кут інструмента істотно відрізняється від значень характерних для стаціонарного точіння. Зміни переднього кута впливають на величину й знак напружень на передній і задній поверхнях різця, а його врахування дозволяє розраховувати напруження та в подальшому оцінювати ймовірність руйнування інструмента.*

**Ключові слова:** врізання і вихід інструмента, розрахунок напружень, заокруглення різальної кромки, передній кут, усадка стружки, круга алмазно-твердосплавна пластина.

*A method of calculation of stresses in a cutting tool during its engagement and disengagement with a workpiece is described. It has been found out that during the workpiece first and last revolutions the tool rake significantly differs from the values typical of stationary stage of turning. The rake variations have an influence on the magnitude and sign of stresses in the tool face and flank surface; taking it into account permits calculating the stresses and then assessing the tool failure probability.*

**Keywords:** tool engagement and disengagement, stress calculation, cutting edge rounding, tool rake, chip reduction, round PCD cutting insert.

1. Бетанели А. И. Расчет хрупкой прочности режущей части инструмента // Надежность режущего инструмента (сборник статей). — Киев: Техника, 1972. — С. 96—105.
2. Девин Л. Н., Сулима А. Г. Особенности расчета вероятности разрушения резца с круглой пластиной // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент — техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. — Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины. — 2008. — Вып. 11. — С. 458—463.
3. Лоладзе Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. — М.: Машиностроение, 1982. — 320 с.
4. Резание металлов и технологическая точность деталей в машиностроении / Под. ред. Ю. А. Розенберга и В. П. Пономарева. — Курган: Изд-во Курганского машиностроительного ин-та, 1968. — 235 с.
5. Грановский Г. И., Грановский В. Г. Резание металлов: Учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов. — М.: Высш. шк., 1985. — 304 с.
6. Виноградов А. А. К вопросу определения сил на задней поверхности инструмента // Сверхтв. материалы. — 1989. — № 1. — С. 140—146.
7. Виноградов А. А. Стружкообразование при точении пластичных металлов инструментом с округленной режущей кромкой // Там же. — 1991. — № 1. — С. 65—70.