

УДК 621.9

**ТЕМПЕРАТУРА РЕЗАНИЯ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ  
ЖАРОСТОЙКИХ СПЛАВОВ НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ**

*Васильков Дмитрий Витальевич, д.т.н., профессор, БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1, e-mail: vasilkovdv@mail.ru.*

*Камыни Алексей Александрович, магистрант кафедры «Технология и производство артиллерийского вооружения», БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 190005, Россия Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1.*

*Чердакова Виктория Сергеевна, магистрант кафедры «Технология и производство артиллерийского вооружения», БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 190005, Россия Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1.*

**Цель статьи** - Рассмотреть научно-методические аспекты определения теплофизических характеристик при высокоскоростной обработке изделий из сплавов на никелевой основе режущими инструментами из минералокерамики. Выполнить анализ отдельных инструментальных материалов из минералокерамики с определением температуры в зоне резания.

**Ключевые слова:** Теплофизика, температура, высокоскоростное резание, никелевые сплавы, минералокерамика.

**CUTTING TEMPERATURE FOR HIGH-SPEED PROCESSING OF HEAT-  
RESISTANT ALLOYS ON A NICKEL BASIS**

*Vasilkov Dmitry Vitalievich - Dr. Sc., professor of the chair «Technology and production of artillery weapons», BSTU «VOENMEH» named after D.F. Ustinov, 190005, Russia, Saint-Petersburg, St. 1-ya Krasnoarmeyskaya, 1, e-mail: vasilkovdv@mail.ru*

*Kamynin Aleksei Aleksandrovich – graduate student of the chair «Technology and production of artillery weapons», BSTU «VOENMEH» named after D.F. Ustinov, 190005, Russia, Saint-Petersburg, St. 1-ya Krasnoarmeyskaya, 1*

*Cherdakova Victoria Sergeevna – graduate student of the chair «Technology and production of artillery weapons», BSTU «VOENMEH» named after D.F. Ustinov, 190005, Russia, Saint-Petersburg, St. 1-ya Krasnoarmeyskaya, 1*

Scientifically-methodical aspects of definition thermophysics characteristics are considered at high-speed processing of products from alloys on a nickel basis by cutting tools from ceramics. The analysis of separate tool materials from ceramics with definition of temperature in the cutting zone.

**Keywords:** Thermophysics, temperature, high-speed cutting, nickel alloys, ceramics.

Определяющим фактором, сдерживающим развитие высокоскоростной обработки (ВСО), является температура в зоне резания. Она существенно ограничивает применение твердосплавного режущего инструмента. Применение режущего инструмента из минералокерамики позволяет увеличить скорость резания в несколько раз по сравнению с традиционными твердосплавными инструментами. Увеличение скорости резания приводит

не только к количественным, но и к качественным изменениям явлений, сопровождающих процесс резания. Так, при точении жаропрочных сплавов на никелевой основе режущими инструментами с пластинами из минералокерамики отмечено появление адиабатической стружки локального сдвига [1], что подтверждает существенное изменение характера процесса деформирования срезаемого слоя металла. В основе определения температурных и силовых зависимостей, отображающих протекание процесса ВСО минералокерамическим инструментом лежит физическая модель образования элемента стружки локального сдвига, предложенная в работе [2].

С увеличением температуры резания предел прочности  $\sigma_B$  и предел текучести  $\sigma_T$  обрабатываемого изделия изменяются. Жаропрочные сплавы на никелевой основе имеют падающую характеристику пластичности [3] в диапазоне температур 750 - 1200<sup>0</sup>С (рис.1).

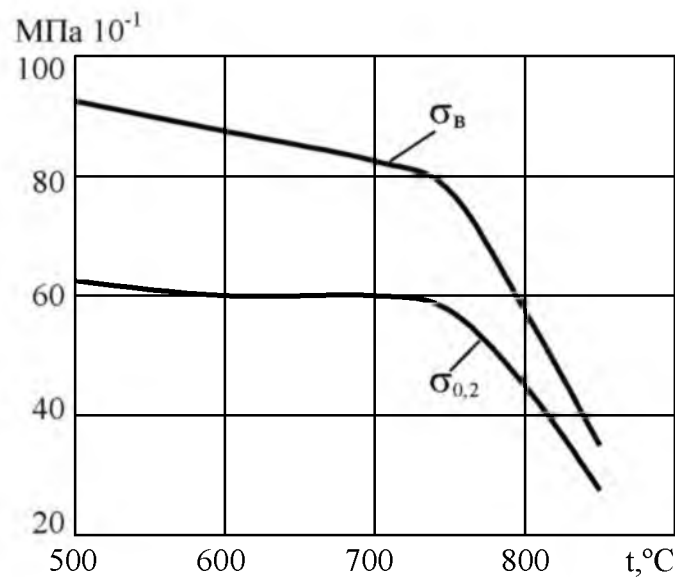


Рис.1. Зависимость изменения характеристик механических свойств жаропрочного сплава ХН77ТЮР от температуры

Указанное связано с повышенной вязкостью жаропрочных сплавов, склонностью к массопереносу и высокой чувствительностью к термомеханическим поверхностным воздействиям. Типичным представителем данных материалов является сплав ХН77ТЮР.

При ВСО сплавов на никелевой основе формируется стружка локального сдвига, которая представляет собой последовательность элементов, разделенных тонкой белой полосой (рис.2.), которая уменьшается с увеличением скорости резания. В предельном состоянии элементы разделяются и стружка становится сыпучей (рис.3).

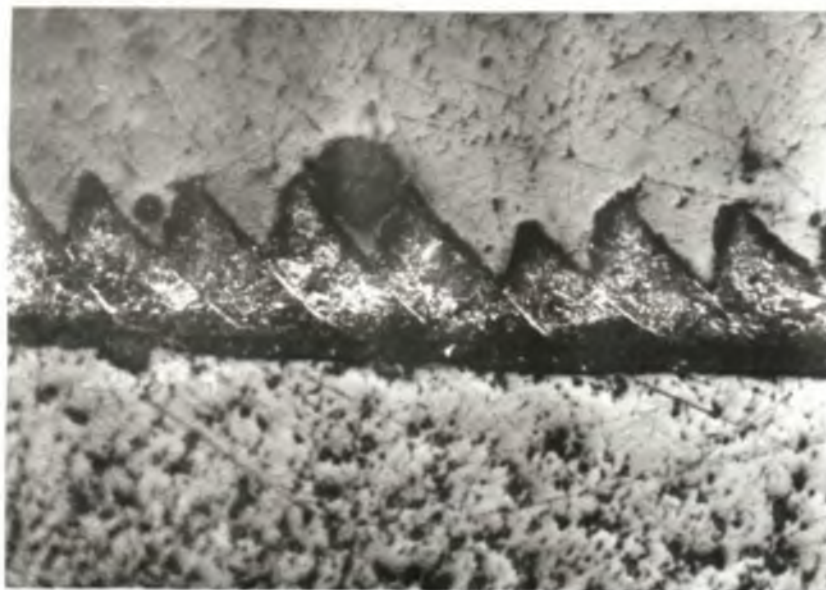


Рис. 2. Фотография со шлифа боковой поверхности стружки, отражающая наличие зоны локализованных пластических деформаций ( $\times 100$ )

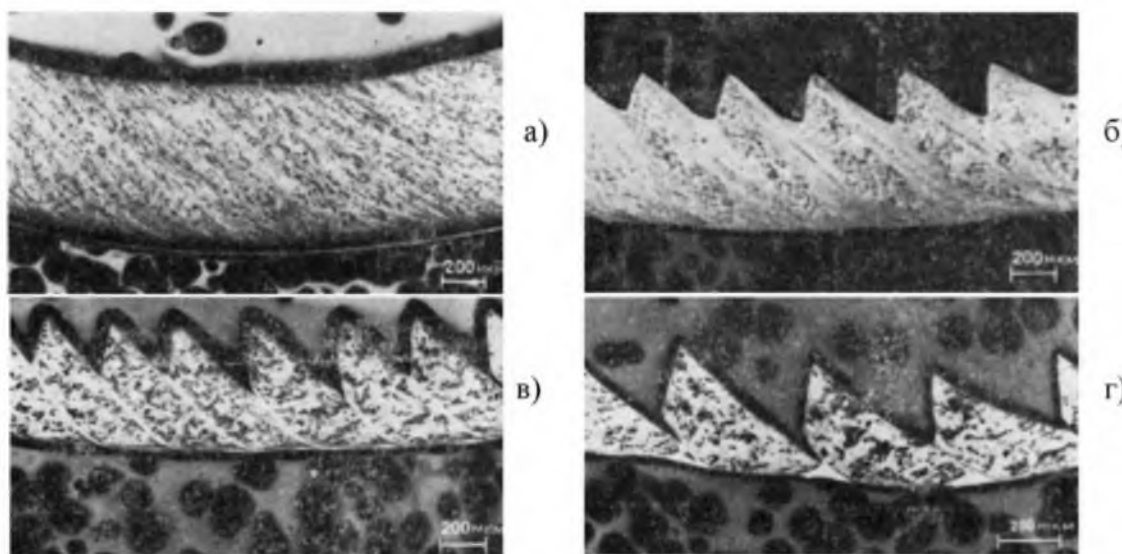


Рис. 3. Фотография шлифов боковой поверхности стружки, при обработке стали марки 40ХН2МА: а — сливная стружка при скорости резания 40 м/мин; б — переход от сливной стружки к стружке локализованного сдвига при скорости резания 125 м/мин; в — стружка чистого локализованного сдвига при скорости резания 250 м/мин; г — стружка локализованного сдвига с практически раздельными сегментами при скорости резания свыше 400 м/мин

Для рассматриваемых условий температуру в плоскости сдвига (рис.4) можно определить по формуле [4]

$$\Theta_{AB} = \frac{k_1 \omega \sqrt{aV} \sigma_T \cos \gamma}{(k_1 \sqrt{aV_c} \lambda \sin \Phi + \lambda \sqrt{\pi \omega} \sqrt{\operatorname{tg} \Phi \cos(\Phi - \gamma)})} \quad (1)$$

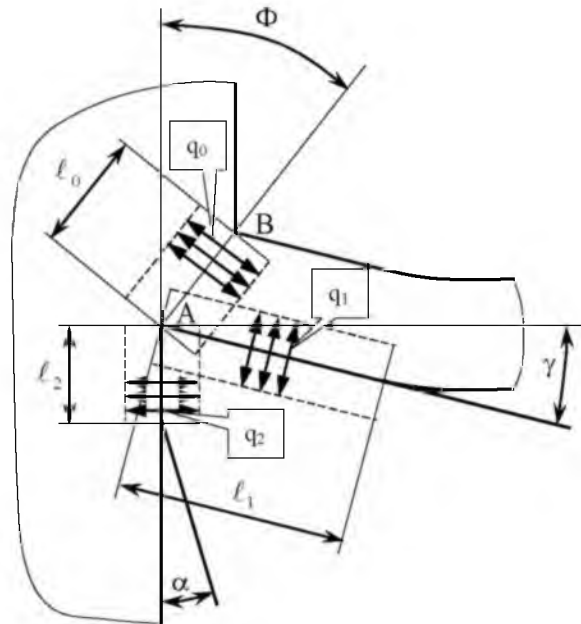


Рис.4. Образование теплового поля в зоне резания

где  $\Theta_{AB}$  – температура в плоскости сдвига;  $\gamma$  - передний угол инструмента;  $\Phi$  - угол сдвига;  $\lambda$  - теплопроводность обрабатываемого материала;  $\omega$  - коэффициент температуропроводности материала,  $k_1$  – поправочный коэффициент;  $a$  – толщина среза;  $V$  – скорость резания;  $\tau$  – напряжение сдвига.

В формуле (1) угол сдвига  $\Phi$  определяется по методике [5], которая основана на справочных данных и хорошо апробирована в расчетно-экспериментальных исследованиях

$$\Phi = \frac{1}{2} \left( \arcsin \left[ k_2 \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_B} - \sin \gamma \right] + \gamma \right), \quad (2)$$

где  $\sigma_{0,2}$  – предел текучести, соответствующий пластической деформации, равной 0,2%;  $k_2$  – поправочный коэффициент.

Предел текучести  $\sigma_T$  является функцией температуры в плоскости сдвига  $\Theta_{AB}$

$$\sigma_T = \sigma_{0,2} e^{-b\Theta_{AB}}, \quad (3)$$

где  $b$  - коэффициент, учитывающий разупрочнение, для сплава ХН77ТЮР  $b = 0,00042$ .

Температура в плоскости сдвига  $\Theta_{AB}$ , судя по формуле (1), также зависит от предела текучести  $\sigma_T$ . Поэтому для определения параметров моделей их следует, рассматривать совместно

$$\begin{cases} \Theta_{AB} = f(\sigma_T) \\ \sigma_T = f(\Theta_{AB}) \end{cases} \quad (4)$$

В зоне резания действуют три основных источника теплоты (рис.4):

- 1)  $q_0$  - теплота деформации в плоскости сдвига;
- 2)  $q_1$  - теплота трения на площадке контакта стружки и передней поверхностью инструмента;
- 3)  $q_2$  - теплота трения между задней поверхностью инструмента и обработанной поверхностью заготовки.

Тепловые потоки, представленные на рис.4, локализованы в отдельных зонах, поэтому их можно рассматривать инвариантно, что существенно упрощает решение задачи баланса температуры в процессе резания.

Средняя температура на поверхностях трения является важным фактором, определяющим теплофизические и механические свойства трибосопряжения, а также адгезионное взаимодействие и сопротивление сдвигу тонких поверхностных слоев. При определении температуры трения для кратковременных процессов высокоскоростного резания можно воспользоваться линейным дифференциальным уравнением теплопроводности для одномерного теплового потока в скользящий элемент (стружка, заготовка, инструмент)

$$\frac{\partial \Theta_i}{\partial \tau_i} = \frac{\omega_i \partial^2 \Theta_i}{\partial z^2}, \quad i = 1, 2, \quad (5)$$

где  $i$  – вид трибосопряжения,  $i = 1$  – трибосопряжение между передней поверхностью инструмента и сходящей стружкой,  $i = 2$  – трибосопряжение между задней поверхностью инструмента и обработанной поверхностью заготовки;  $\Theta_1$  – температура трения на площадке контактирования передней поверхности инструмента и стружки;  $\Theta_2$  – температура трения на площадке контактирования задней поверхности инструмента и обработанной поверхности заготовки;  $\tau_1$  – время контакта передней поверхности режущего инструмента и сходящей стружки на исследуемом участке;  $\tau_2$  – время контакта задней поверхности режущего инструмента и обработанной поверхности заготовки на исследуемом участке;  $z$  – направление, ортогональное площадке контактирования;  $\omega_1$  – коэффициент теплопроводности инструментального материала;  $\omega_2$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала.

Решение уравнения (5) дает выражение для температуры поверхности трения

$$\Theta_{\text{тр}i} = \Theta_0 + \frac{2q_i \sqrt{\omega_i \tau_i}}{\lambda_i \sqrt{\pi}}, \quad i = 1, 2, \quad (6)$$

где  $\Theta_0$  – начальная температура в трибосопряжении.

В формуле (6)  $q_1$  – мощность теплового потока, направленного в скользящий элемент,  $q_1 = \alpha_{\text{тр}} q$ , где  $q$  – теплота, генерируемая при трении в единицу времени на единицу поверхности, тепловой поток, направленный в скользящий элемент и являющийся частью общего теплового потока. Значение  $\alpha_{\text{тр}}$  определяет эту часть. Для малых скоростей относительных перемещений при контактировании

$$\alpha_{\text{тр}} = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2}, \quad (7)$$

где  $\lambda_1$  – теплопроводность инструментального материала;  $\lambda_2$  – теплопроводность обрабатываемого материала.

Для больших скоростей рекомендуется формула [11]

$$\alpha_{\text{тр}} = \frac{4\lambda_1}{4\lambda_1 + \lambda_2 \sqrt{\pi Pe}}, \quad (8)$$

где  $Pe = \frac{Va}{\omega}$  – критерий, аналогичный критерию Пекле;  $V$  – скорость резания.

Эта формула получена из условия равенства максимальных температур на контакте.

Удельная интенсивность тепловыделения на контакте

$$q_1 = f \alpha_{\text{тр}} p_a V, \quad (9)$$

где  $f$  – коэффициент трения, нелинейно зависящий от скорости скольжения (для Ni сплавов по керамике  $f = 0,5 \dots 0,6$ );  $p_a$  – удельная сила резания;  $p_a = P_z / S_k$ ;  $P_z$  – основная

составляющая силы резания (в касательном направлении)  $S_k$  - площадь контакта стружки с резцом.

Таким образом, по формуле (6) может быть рассчитана температура на поверхности контакта стружки с резцом и заготовки с резцом, являющаяся следствием только фрикционного контакта. Вторичными тепловыми потоками, например стоком тепла от передней поверхности через режущий клин в заготовку, пренебрегаем ввиду низкой теплопроводности режущей керамики.

Материал заготовки, отдеформированный на первой стадии образования элемента стружки, имеющей температуру по всей ширине ленты стружки  $\Theta_{AB}$  попадает в условия фрикционного контакта с передней поверхностью резца и "подогревается" дополнительно за счет превращения работы трения в тепло. Средняя температура на поверхности контакта элемента стружки с передней поверхностью резца равна сумме

$$\Theta_{II} = \Theta_{AB} + \Theta_{TP1}, \quad (10)$$

так как является следствием суперпозиции двух тепловых источников.

Средняя температура на задней поверхности резца рассчитывается аналогично

$$\Theta_{IP2} = \Theta_0 + \frac{2q_2 \sqrt{\omega \tau_2}}{\lambda_1 \sqrt{\pi}}, \quad i = 1, 2 \quad (11)$$

$q_2$  - мощность теплового источника на задней поверхности, рассчитывается по формуле

$$q_2 = 0,71q_1.$$

Время контакта заготовки с задней поверхностью резца  $\tau_2 = h_3/V$  ( $h_3 = \ell_2$  - износ по задней поверхности инструмента) является переменной величиной, зависящей от износа и скорости резания.

Средняя температура на поверхности контакта передней поверхности резца с обработанной поверхностью заготовки определяется по аналогии с (10)

$$\Theta_3 = \Theta_{AB} + \Theta_{TP2}, \quad (12)$$

На рис.5 представлены результаты расчета температуры в зоне резания при обработке точением сплава ХН77ТЮР режущим инструментом из минералокерамики. На рисунке обозначено:  $Teta_{AB}$  - температура в плоскости сдвига;  $Teta_1$  - температура трения на площадке контактирования передней поверхности инструмента и стружки;  $Teta_2$  - температура трения на площадке контактирования задней поверхности инструмента и обработанной поверхности заготовки;  $Teta_3$  - средняя температура на поверхности контакта передней поверхности резца с обработанной поверхностью заготовки;  $Teta_{II}$  - Средняя температура на поверхности контакта элемента стружки с передней поверхностью резца.

На основе рассмотренной методики было проведено исследование при обработке сплавов на Ni основе (Инконель 718, Нимоник 75, Инкалой 901 и др.) сборным инструментом с минералокерамическими пластинками различных групп на скоростях резания  $V_c = 100 \dots 750$  м/мин, при подачах  $S = 0,075 \dots 0,4$  мм/об и глубинах резания  $t = 1 \dots 6,5$  мм.

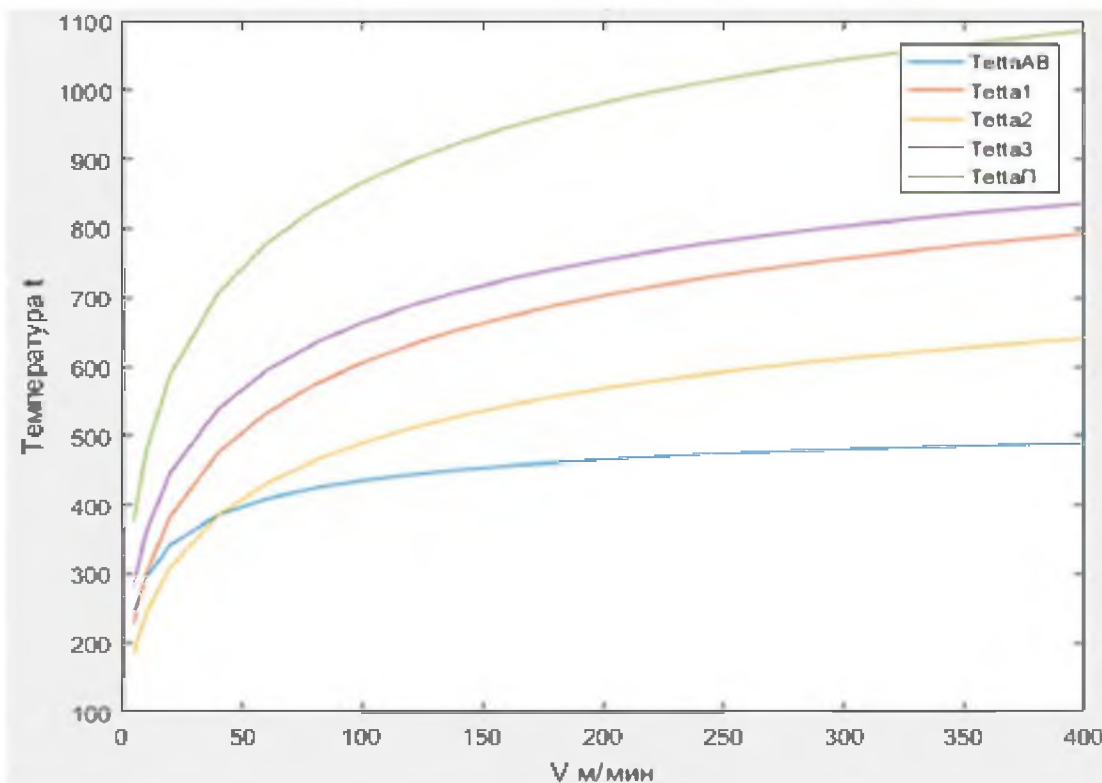


Рис.5. температуры в зоне резания при обработке точением сплава ХН77ТЮР режущим инструментом из минералокерамики

**Выводы:** Рассмотрены научно-методические аспекты определения теплофизических характеристик при высокоскоростной обработке изделий из сплавов на никелевой основе режущими инструментами из минералокерамики. Проведен анализ отдельных инструментальных материалов из минералокерамики с определением температуры в зоне резания.

#### Список литературы

1. Командури Р., Шредер Г.А. Неустойчивость сдвиговых деформаций при обработке резанием железоникелевого жаропрочного сплава // Конструирование и технология машиностроения/ Труды Америк. Общества инж.-механиков. – 1986, № 2, с. 121-135.
2. Komanduri R. Some aspects of machining with negative rake angles simulating grinding, Int. J. Mach. Tool. Des. Res. 11 (1971) 223-233.
3. Макаров А.Д., Проскуряков С.Л., Ипатов Н.С., Паокина Л.С. Технологические возможности инструментов из композита при резании жаропрочных сплавов на никелевой основе // Технологическое обеспечение надежности и долговечности деталей машин. Ярославль, ЯПИ. – 1987, с. 74-77.
4. Петров П.П. Повышение эффективности высокоскоростного резания пластичных металлов. Автореф. дисс. канд. техн. наук.- Санкт-Петербург, 1992.- 16 с.
5. Райт Р.К. Расчет угла сдвига при резании на основании характеристик деформационного упрочнения // Конструирование и технология машиностроения.- 1982.- т. 104, №3,- С. 177 - 186.
6. Балакин В.А. Трение и износ при высоких скоростях скольжения. М.: Машиностроение, 1960. 136 с.