

УДК 621

doi: 10.21685/2072-3059-2023-2-9

Исследование тепловых процессов при шлифовании ножей из труднообрабатываемых сталей

Т. Н. Иванова¹, Г. В. Козлов², А. Ю. Муйземнек³

¹Удмуртский федеральный исследовательский центр

Уральского отделения Российской академии наук, Ижевск, Россия

¹Чайковский филиал Пермского национального исследовательского
политехнического университета, Чайковский, Россия

^{2,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹rsg078829@mail.ru, ²gvk@yandex.ru, ³muyzemnek@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В современном машиностроении широкое распространение получили ножи из труднообрабатываемых сталей, главным преимуществом которых является повышенная теплостойкость и износостойкость. К ножам предъявляются высокие требования по геометрической точности поверхностей и физико-механическому состоянию поверхностного слоя, что обуславливает сложность назначения параметров их механической обработки. Цель исследования – разработка математических моделей и исследование тепловых процессов при шлифовании ножей из труднообрабатываемых сталей. *Материалы и методы.* Использованы аналитические методы исследования тепловых процессов в пластинах, математические модели распределения температурных полей по поверхности и по глубине детали. *Результаты.* Разработаны математические модели и проведено компьютерное моделирование тепловых процессов для типовых тепловых схем шлифования – с полосовым источником, с ограниченным источником и с ограниченным источником по кромке ножа. Результаты проверены экспериментально металлографическими опытно-промышленными исследованиями. *Выводы.* Воздействие температуры в зоне шлифования и остаточных напряжений на поверхностный слой обрабатываемой детали влияет на геометрическую форму ножей. Коробление тем больше, чем выше температура шлифования и чем больше на шлифуемой поверхности глубина нагретого слоя.

Ключевые слова: шлифование, нож, тепловые процессы, труднообрабатываемая сталь, пластина, температура, микроструктура стали

Для цитирования: Иванова Т. Н., Козлов Г. В., Муйземнек А. Ю. Исследование тепловых процессов при шлифовании ножей из труднообрабатываемых сталей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 2. С. 118–129. doi: 10.21685/2072-3059-2023-2-9

The study of thermal processes during grinding knives from hard-to-cut steels

T.N. Ivanova¹, G.V. Kozlov², A.Yu. Muiyemnek³

¹Udmurt Federal Research Center, Ural Branch

of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia

¹Tchaikovsky branch of Perm State Polytechnic University, Tchaikovsky, Russia

^{2,3}Penza State University, Penza, Russia

¹rsg078829@mail.ru, ²gvk@yandex.ru, ³muyzemnek@yandex.ru

© Иванова Т. Н., Козлов Г. В., Муйземнек А. Ю., 2023. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Abstract. *Background.* In modern mechanical engineering, knives made of hard-to-cut steels are widely used, the main advantage of which is increased heat resistance and wear resistance. The knives are subject to high demands on the geometric accuracy of surfaces and the physical and mechanical state of the surface layer, which makes it difficult to assign the parameters of their machining. The purpose of the research is to develop mathematical models and to study thermal processes in the grinding of knives from hard-to-cut steels. *Materials and methods.* Analytical methods for studying thermal processes in plates, mathematical models for the distribution of temperature fields over the surface and depth of the part are used. The results are verified experimentally by metallographic pilot studies. *Results.* Mathematical models have been developed and computer simulation of thermal processes for typical grinding schemes has been carried out - processing the entire surface line by line for the entire width of the circle, processing along the edge and sharpening the edge of the knife. The results have been verified experimentally by metallographic pilot studies. *Conclusions.* The effect of temperature in the grinding zone and residual stresses on the surface layer of the workpiece affects the geometric shape of the knives. Warping is the greater, the higher the grinding temperature and the greater the depth of the heated layer on the surface to be ground.

Keywords: grinding, knife, thermal processes, hard-to-cut steel, plate, temperature, steel microstructure

For citation: Ivanova T.N., Kozlov G.V., Muyzemnek A.Yu. The study of thermal processes during grinding knives from hard-to-cut steels. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* = *University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2023;(2):118–129. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2023-2-9

Введение

В современном машиностроении получили широкое распространение ножи из труднообрабатываемых сталей, главным преимуществом которых является повышенная теплостойкость и износостойкость. Проблемной является их механическая обработка, так как к деталям предъявляются высокие требования по геометрической точности поверхностей (отклонения от плоскостности, прямолинейности профиля, волнистости и шероховатости) и по физико-механическому состоянию поверхностного слоя [1–6].

Существующие технологические процессы механической обработки ножей из труднообрабатываемых материалов включают последовательно такие традиционные операции, как фрезерная, окончательное шлифование, полирование и др. Когда требования к обрабатываемым поверхностям особенно высоки, на предприятиях отрасли ограничиваются одним из производительных способов интенсивного шлифования или дополняют существующую технологию специальными отделочными операциями, обеспечивающими заданное качество поверхности

К наиболее производительным методам относится плоское шлифование. Анализ производственного опыта и научной информации позволяет заключить, что широкое внедрение плоского шлифования сдерживается из-за высокой теплонапряженности процесса. Кроме того, при шлифовании данных материалов замечена повышенная склонность к образованию прижогов и трещин со значительной толщиной дефектного слоя и низкой стойкости шлифовальных инструментов.

Особое место среди материалов, применяемых для изготовления специзделий, занимают легированные стали 8ХФ, 4Х13, 9Х18, ХВГ, 9ХС используемые в клинках модели 6Х4, 6Х5. (рис. 1). Такие ножи-клинки

обладают высокой твердостью, износоустойчивостью, износостойкостью. Исходная структура труднообрабатываемой стали, как правило, мартенсит с карбидами железа и хрома, остаточный аустенит [3, 5].

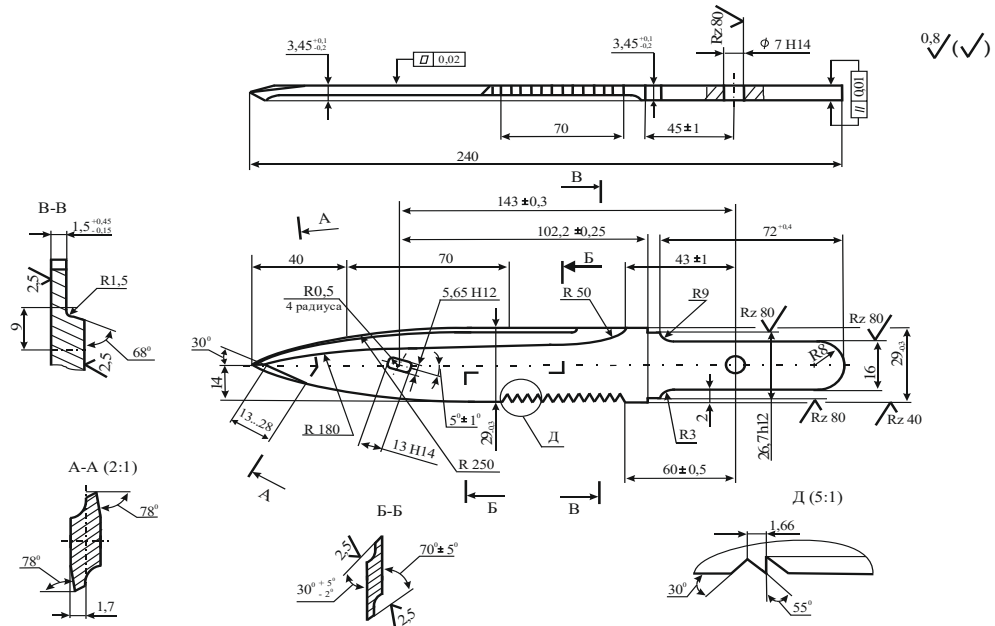


Рис. 1. Клинок 6X4, 6X5

При механической обработке сильно нагреваемых участков происходит распад мартенсита с образованием трооститной структуры и появляются участки прижога с более низкой твердостью. Превращение аустенита создает дополнительные напряжения и может привести к образованию трещин в металле. Поэтому механическая обработка клинков ведется на заниженных режимах, а окончательная заточка режущей кромки выполняется вручную.

1. Математические модели тепловых процессов при шлифовании ножей

Непосредственное влияние на геометрическую точность, качество и физико-механическое состояние поверхностного слоя ножей из труднообрабатываемых материалов при шлифовании оказывают процессы теплообразования и пластической деформации, развивающиеся в зоне обработки. Степень их влияния определяется: интенсивностью воздействия инструмента на деталь; временем контакта инструмента и детали; элементами режима резания; характеристиками круга; механическими и теплофизическими свойствами материала детали; свойствами смазочно-охлаждающей жидкости и т.д.

Тепловой процесс сопровождается мгновенным кратковременным (10^{-5} – 10^{-6} с) нагревом с температурой 600–800 °С, скоростью 10^5 – 10^8 град/с. За мгновенным нагревом следует немедленный быстрый отвод тепла от поверхностных слоев вглубь металла изделия, за счет его теплопроводности с близкой скоростью. В результате этого высокоскоростного термического

процесса происходит неравномерный прогрев поверхностного слоя, температурное поле затухает на очень малой глубине и создается высокий температурный градиент [1, 2]. Высокая скорость термических процессов приводит к структурным превращениям обрабатываемого материала. Основными факторами, обеспечивающими заданную твердость и прочность режущей кромки ножа, являются мартенситная структура, степень превращений и дисперсности распада аустенита.

В основу математического моделирования тепловых явлений при шлифовании ножей было положено следующее допущение: температура шлифуемой поверхности является результатом суммарного наложения тепловых импульсов, интенсивность и число которых зависят от характеристик абразивного инструмента, теплофизических свойств обрабатываемого материала и режимов резания. Удаляемый слой металла при обработке, превращаясь в стружку, подвергается интенсивной пластической деформации с высоким удельным давлением. Основная часть тепла, образующегося в результате деформации, остается в деформируемом объеме и сильно разогревает его. Этот эффект усиливается, оттого что очередное зерно абразивного инструмента врежется в разогретый металл от предшествующих зерен.

При шлифовании ножей возможны следующие схемы обработки:

- обработка всей поверхности построчно на всю ширину круга (рис. 1а,б);
- обработка по краю – заточка кромки ножа (рис. 1,в). При заточке ножей зона контакта определяется шириной затачиваемой кромки;
- без смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) или с подачей в зону контакта круга и обрабатываемой поверхности или на свободные поверхности.

Особенностью шлифования по кромке операции заточки является то, что температурное поле обрабатываемой поверхности представляет собой в сечении клин, по одной грани которого движется источник тепла. Область, близкая к ребру, будет существенно отличаться от температурного поля самого ножа. Заточка характеризуется большим теплоотводом в деталь из-за малых сечений снимаемого слоя и небольшого отвода тепла в абразивный круг.

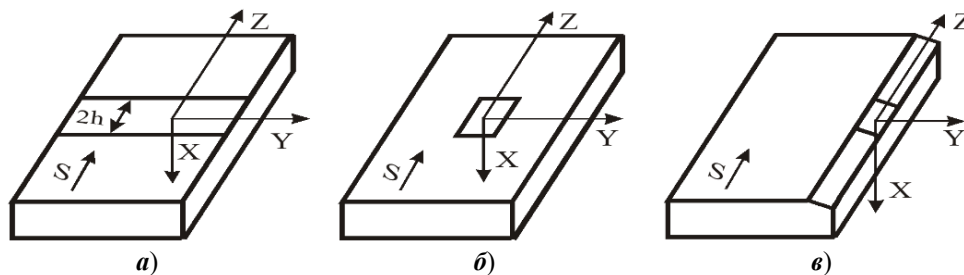


Рис. 2. Тепловые схемы при обработке ножей: а – с полосовым источником; б – с ограниченным источником; в – с ограниченным источником по кромке

В этом случае задача по расчету температурного поля решается при следующих условиях:

- по поверхности клина с углом при вершине $\alpha = \frac{\pi}{m}$ (где m – целое вещественное число) в направлении оси Z движется полосовой источник шириной $2h$;

– плотность теплового потока q принята равномерно распределенной по всей поверхности источника.

Решение этой задачи удобно осуществлять в цилиндрической системе координат. В этом случае необходимо найти решение дифференциального уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \vartheta \frac{\partial T}{\partial z} \quad (1)$$

с краевыми условиями

$$\left. \frac{\lambda}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right|_{\theta=0} = q = \text{const}, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial \theta} \right|_{\theta=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial \theta} \right|_{\theta=\alpha} = 0, \quad (2)$$

$-h < z < h$ $z < -h$ $z > h$

где a – коэффициент температуропроводности материала; ϑ – скорость источника; r, θ, z – цилиндрические координаты (рис. 3).

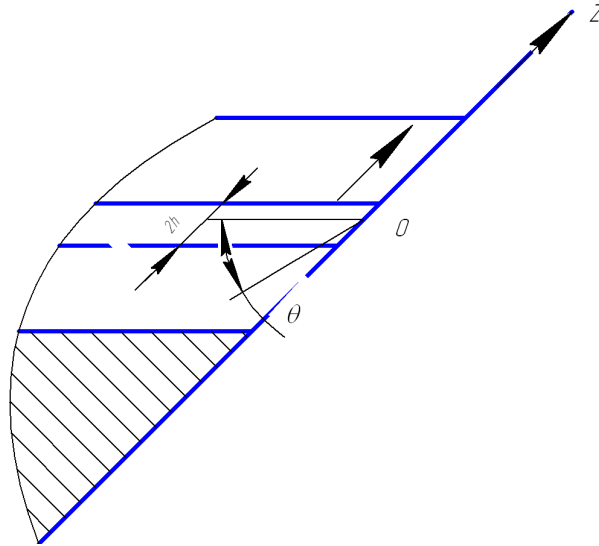


Рис. 3. Расчетная тепловая схема подвижного полосового источника на поверхности клина

Выражение температурного поля в клине можно представить суммированием отдельных источников:

$$\begin{aligned} \partial T = \sum_{n=0}^{m-1} \frac{2qdr'dz'dt}{c\gamma[4\pi a(t-t')]^{3/2}} \times \\ \times \exp \left\{ -\frac{r^2 + r'^2 - 2rr' \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{m}n \right) [z - z' + \vartheta(t-t')]^2}{4a(t-t')} \right\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Проинтегрировав выражение (3):

$$T = \sum_{n=0}^{\frac{\pi}{\alpha}-1} \int_0^{\infty} dr' \int_{-h}^h dz' \int_0^{\infty} \frac{2q}{c\gamma[4\pi a(t-t')]^{3/2}} \times \\ \times \exp \left\{ -\frac{r^2 + r'^2 - 2rr' \cos(\theta - 2\alpha n) + [z - z' + \vartheta(t-t')]^2}{4a(t-t')} \right\} dt', \quad (4)$$

после преобразования получим зависимость температурного поля на поверхности клина:

$$T = \int_{-h}^h \frac{q}{2\pi\lambda} \exp \left[-\frac{\vartheta(z-z')}{2a} \right] K_0 \left\{ \frac{\vartheta^2}{4a^2} \left[r^2 \sin^2(\psi - 2\alpha n) + (z-z')^2 \right] \right\}^{1/2} \times \\ \times \left(1 + \sum_{n=0}^{\frac{\pi}{\alpha}-1} \frac{1}{K_0 \left\{ \frac{\vartheta^2}{4a^2} \left[r^2 \sin^2(\psi - 2\alpha n) + (z-z')^2 \right] + \eta^2 \right\}^{1/2}} \right) \times \\ \times \int_0^{\frac{\vartheta}{2\alpha} r \cos(\psi - 2\alpha n)} \frac{\exp \left(-\left\{ \frac{\vartheta^2}{4a^2} \left[r^2 \sin^2(\psi - 2\alpha n) + (z-z')^2 \right] + \eta^2 \right\}^{1/2} \right)}{\left\{ \frac{\vartheta^2}{4a^2} \left[r^2 \sin^2(\psi - 2\alpha n) + (z-z')^2 \right] + \eta^2 \right\}^{1/2}} d\eta \right) dz', \quad (5)$$

где q – плотность теплового потока; λ – коэффициент теплопроводности материала; α – число отраженных источников; h – полуширина источника; $K_0(u)$ – функция Бесселя второго рода нулевого порядка; r, ψ, z – цилиндрические координаты; z' – координата, учитывающая неограниченность источника; n – число тепловых импульсов; r' – текущая координата рассматриваемой точки; $\frac{\vartheta[r' - r \cos(\psi - 2\alpha n)]}{2a} = \eta, \frac{\vartheta}{2a} dr' = d\eta$.

Подынтегральная функция выражения (5) описывает температурное поле линейного источника, движущегося по поверхности клина, а сумма в скобках характеризует влияние ограниченности детали на температурное поле.

Обозначив сумму, характеризующую влияние ограниченности детали как $M(\xi, \rho, \theta, \alpha)$, общее решение расчета температур в клине можно представить в виде

$$T = \int_{-h}^h M(\xi, \rho, \theta, \alpha) \frac{q}{\pi\lambda} \exp \left[-\frac{\vartheta(z-z')}{2a} \right] \times$$

$$\times K_0 \left\{ \frac{\vartheta^2}{4a^2} \left[r^2 \sin^2(\theta - 2\alpha n) + (z - z')^2 \right] + \eta^2 \right\}^{1/2} dz'. \quad (6)$$

Для любого из углов клина множитель M может быть вычислен. На рис. 4 приведена зависимость множителя M от z и ρ для поверхности клина с $\alpha = 60^\circ$. Для режущей кромки клина ($\rho = 0$) во всех случаях множитель $M = 1,5$. Это значит, что температура режущей кромки клина в 1,5 раза выше, чем температура на поверхности клина при тех же условиях. По мере удаления от режущей кромки клина значения множителя M убывают. В области непосредственно под источником (при малых значениях z) множитель M быстро стремится к единице, что характеризует слабое влияние ограниченности изделия на температурное поле непосредственно под источником. Чем дальше от источника, тем сильнее сказывается влияние ограниченности изделия, но само значение температуры вдали от источника мало.

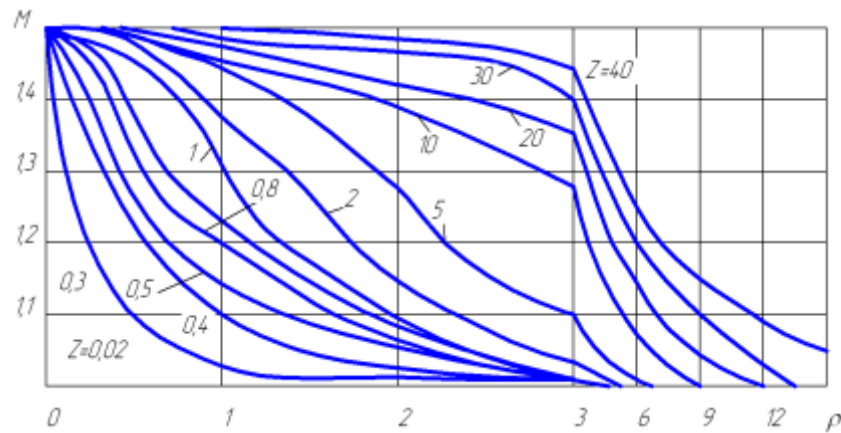


Рис. 4. Зависимость множителя M от Z и ρ для клина с $\alpha = 60^\circ$

При обработке режущей кромки наличие второй плоской поверхности, омываемой СОЖ, может существенным образом повлиять на распределение температуры в области нагрева клина. Окончательное общее решение по расчету температуры на режущей кромке с учетом действия охлаждающей жидкости будет

$$T = \frac{2qa}{\pi\lambda V_u} M_{cp}(\rho, \alpha, \varphi) B(\beta, \chi) \theta, \quad (7)$$

где $\theta = \int_{Z-H}^{Z+H} \exp(\zeta) K_0 \left(\sqrt{\rho^2 \sin^2 \varphi + \zeta^2} \right) d\zeta$; α – коэффициент теплообмена;

β – комплекс теплообмена; φ – угол раствора клина; χ – линейная координата.

Анализ выражения (7) показывает, что наиболее важным элементом, влияющим на коэффициент теплообмена, является угол клина. С его увеличением коэффициент теплообмена увеличивается. При $\rho \rightarrow \infty$, т.е. в точках шлифуемой поверхности, далеко удаленной от ребра, влияние ограниченности размеров детали снижается. С увеличением коэффициента теплопровод-

ности материала коэффициент теплообмена прямо пропорционально увеличивается и резко снижается с увеличением кинематической вязкости жидкости и коэффициента температуропроводности материала.

При анализе теплообмена на температурное поле при заточке ножей по кромке было установлено, что теплообмен слабо влияет на температуру непосредственно под источником, так как тепло, выделяющееся в зоне контакта, передается СОЖ теплопроводностью конвективного переноса, действие охлаждения происходит не одновременно с тепловыделением, а с запаздыванием. Зона тепловыделения является закрытой для теплообмена с жидкостью.

Другая ситуация складывается при шлифовании ножей с областью клина. Наличие второй (кроме шлифуемой) свободной поверхности, омываемой СОЖ, существенно влияет на распределение температуры в области наибольшего нагрева, т.е. вблизи ребра клина.

Рассмотрим процесс шлифования ножей по кромке с областью клина с тем изменением, что шлифование идет с принудительным охлаждением и на всех свободных поверхностях осуществляется теплообмен по закону Ньютона – Рихмана. Математически такая задача сведется к решению дифференциального уравнения (1) с граничными условиями:

$$\left. \frac{\lambda}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right|_{\theta=0} = q = \text{const}, \quad -\left. \frac{\lambda}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right|_{\theta=0, \left| \frac{z}{h} \right| > h} + \alpha T \Big|_{\theta=0, \left| \frac{z}{h} \right| > h} = 0,$$

$$-\left. \frac{\lambda}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right|_{\theta=\frac{\pi}{m}} + \alpha T \Big|_{\theta=\frac{\pi}{m}} = 0, \quad (8)$$

где α – коэффициент теплообмена.

Задавая угол клина, можно получить частное фундаментальное решение расчета температуры на кромке пластины. Например, рассмотрим клин с $\alpha_y = 90^\circ$, по одной из граней которого движется полосовой источник тепла. В данном случае целесообразно сформулировать стационарную задачу в декартовых координатах:

$$\alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + v \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

с граничными условиями:

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0, \left| \frac{z}{h} \right| < h} = q = \text{const}, \quad -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0, \left| \frac{z}{h} \right| > h} + \alpha T \Big|_{x=0, \left| \frac{z}{h} \right| > h} = 0, \quad -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} + \alpha T \Big|_{y=0} = 0. \quad (10)$$

Если ввести обозначения комплексов:

$$\theta = \frac{\pi \lambda v T}{2 q a}, \quad \beta = \frac{2 \alpha a}{\lambda v}, \quad X = \frac{v x}{2 a}, \quad Y = \frac{v y}{2 a}, \quad Z = \frac{v z}{2 a}, \quad H = \frac{v h}{2 a}, \quad (11)$$

то получим безразмерный вид:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} + 2 \frac{\partial \theta}{\partial Z} = 0, \quad (12)$$

$$-\frac{\partial \theta}{\partial X} \Big|_{X=0} = \pi, \quad -\frac{\partial \theta}{\partial X} \Big|_{X=0} + \beta \theta \Big|_{X=0} = 0, \quad -\frac{\partial \theta}{\partial Y} \Big|_{Y=0} + \beta \theta \Big|_{Y=0} = 0. \quad (13)$$

Окончательное решение по расчету температуры на ребре с учетом действия охлаждающей жидкости можно представить в виде зависимости

$$T = \frac{2qa}{\pi \lambda V_u} M_{cp}(\rho, \alpha, \varphi) B(\beta, \chi) \theta, \quad (14)$$

где $\theta = \int_{Z-H}^{Z+H} \exp(\zeta) K_0 \left(\sqrt{\rho^2 \sin^2 \varphi + \zeta^2} \right) d\zeta.$

Для обеспечения гарантированного теплообмена при шлифовании необходимо учитывать коэффициент теплообмена, теплофизические свойства охлаждающей жидкости и обрабатываемого материала.

2. Результаты экспериментальных исследований пепловых процессов при шлифовании ножей

Теоретические исследования изменения температуры на поверхности клина были проверены цифровыми технологиями с помощью 3D-моделирования (рис. 5). Результаты показывают сходимость.

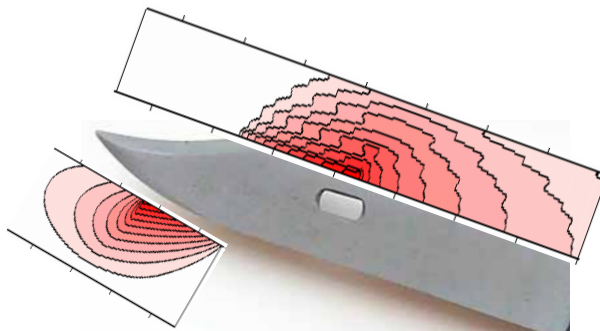


Рис. 5. Моделирование теплового потока на поверхности и режущей кромке клина

Характер изменения микроструктуры стали 8ХФ и ее твердости представлен на рис. 6. Все клинки были с одинаковой микроструктурой, однородной по всему сечению, состоящей из мелкозернистого перлита и карбидов. По степени дисперсности зерен цементита в перлите данная микроструктура соответствует 4 баллу шкалы 2 ГОСТ 8233–56. Изменений микроструктуры у поверхности обезуглероженного слоя на всех клинках не выявлено.

Установлено, что до температуры нагрева 350 °С, твердость клинка не изменяется. Микроструктура металла состоит из троостита и карбидов. При температуре нагрева от 400 до 700–750 °С происходит снижение твердо-

сти HRC с 51–52 до 20–25. С повышением температуры нагрева до 600 °С микроструктура укрупняется и состоит из сорбита и карбидов. При нагреве образцов до 800–850 °С с быстрым охлаждением происходит вторичная закалка металла; при этом твердость HRC повышается до 60–65. При проверке на магнитном дефектоскопе на клинках, претерпевших вторичную закалку после нагрева до температур 800–850 °С и быстром охлаждении, наблюдается наличие трещин. Нагрев выше критических точек A_{c1} и A_{c2} вызывает вторичную закалку металла, а нагрев от 500 до 700 °С приводит к отпуску.

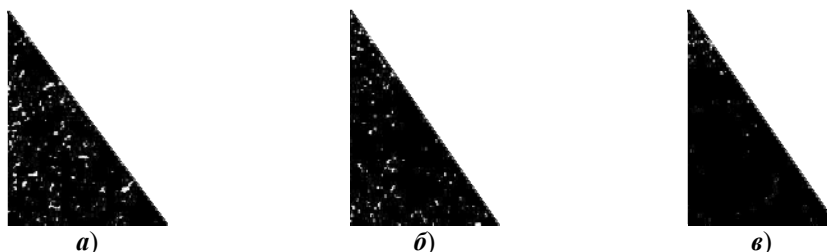


Рис. 6. Микроструктура стали 8ХФ: *а* – после закалки (исходная); *б* – после закалки и отпуска; *в* – после вторичной закалки. $\times 200$

Исследования по определению температуры в зоне резания в зависимости от режимов обработки при различных схемах шлифования приведены в табл. 1. Результаты металлографического анализа согласуются с полученными данными изменения температуры в динамике по сечению ножа. Это подтверждает точность проведения эксперимента.

Таблица 1

Максимальная температура на кромке клинков
в зависимости от схемы заточки режимов обработки

Схема движения	Абразивный инструмент	Охлаждение	Мощность резания, кВт	Режимы заточки			Температура, T_{max} , °С
				$v_{кр}$, м/с	v_d , м/мин	t , мм	
Вдоль режущей кромки «клинка»	AC4MO13 100/80 100 %	+	0,18	25	0,05	0,35	280
		+	0,22	25	0,10	0,40	310
		+	0,25	25	0,15	0,42	355
		–	0,63	25	0,25	0,40	510
Поперек режущей кромки «клинка»	AC2K1 125/100 100 %	+	0,25	25	0,02	0,41	220
		+	0,48	25	0,05	0,38	340
		+	0,96	25	0,15	0,40	490

Заключение

Таким образом, теоретические и экспериментальные исследования тепловых процессов при шлифовании ножей из труднообрабатываемых сталей позволили сделать следующие выводы:

1. Разработаны математические модели и проведено компьютерное моделирование тепловых процессов для типовых тепловых схем шлифования – с полосовым источником, с ограниченным источником и с ограниченным ис-

точником по кромке ножа. Результаты проверены экспериментально металлографическими опытно-промышленными исследованиями.

2. Воздействие температуры в зоне шлифования и остаточных напряжений на поверхностный слой обрабатываемой детали влияет на геометрическую форму ножей. Коробление тем больше, чем выше температура шлифования и чем больше на шлифуемой поверхности глубина нагретого слоя.

3 Результаты металлографического анализа согласуются с полученными данными изменения температуры в динамике по сечению ножа.

Список литературы

1. Иванова Т. Н., Долганов А. М. Современная оснастка в технологии алмазного торцового шлифования плоских поверхностей : монография. Екатеринбург ; Ижевск : Изд-во Института Экономики УрО РАН, 2007. 364 с.
2. Сипайлов В. А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. М. : Машиностроение, 1978. 167 с.
3. Иванова Т. Н. Исследование структуры поверхностного слоя при шлифовании // Обработка металлов. Технология. Оборудование, инструменты. 2005. № 3 (28). С. 30–32.
4. Никитина И. П., Поляков А. Н. Особенности протекания тепловых процессов в двусторонних торцешлифовальных станках // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2021. № 1. С. 82–94.
5. Иванова Т. Н. Технологические особенности изготовления клинка // Наука и технологии : материалы XLII Всероссийской конференции, посвященной 75-летию Государственного ракетного центра им. академика В. П. Макеева. М. : РАН, 2022. Т. 3. С. 116–124.
6. Дементьев В. Б., Иванова Т. Н., Долганов А. М. Исследование температуры нагрева и охлаждения массивных, тонких и клиновидных пластин из труднообрабатываемых сталей при их шлифовании // Инженерно-физический журнал. 2017. Т. 90, № 1. С. 108–115.

References

1. Ivanova T.N., Dolganov A.M. *Sovremennaya osnastka v tekhnologii almaznogo tortsovogo shlifovaniya ploskikh poverkhnostey: monografiya* = Modern equipment in the technology of diamond face grinding of flat surfaces: monograph. Ekaterinburg; Izhevsk: Izd-vo Instituta Ekonomiki UrO RAN, 2007:364. (In Russ.)
2. Sipaylov V.A. *Teplovye protsessy pri shlifovanii i upravlenie kachestvom poverkhnosti* = Thermal processes during grinding and surface quality control. Moscow: Mashinostroenie, 1978:167. (In Russ.)
3. Ivanova T.N. The study of the structure of the surface layer during grinding. *Obrabotka metallov. Tekhnologiya. Oborudovanie, instrumenty* = Metal processing. Technology. Equipment, tools. 2005;(3):30–32. (In Russ.)
4. Nikitina I.P., Polyakov A.N. Features of thermal processes in double-sided face grinding machines. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova* = Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2021;(1):82–94. (In Russ.)
5. Ivanova T.N. Technological features of blade manufacturing. *Nauka i tekhnologii: materialy XLII Vserossiyskoy konferentsii, posvyashchennoy 75-letiyu Gosudarstvennogo raketnogo tsentra im. akademika V.P. Makeeva* = Science and technologies: proceedings of the 42nd All-Russian conference, dedicated to the 75th anniversary of State Missile Center named after academician V.P. Makeev. Moscow: RAN, 2022;3:116–124. (In Russ.)

6. Dement'ev V.B., Ivanova T.N., Dolganov A.M. Study of heating and cooling temperatures of massive, thin and wedge-shaped plates made of hard-to-cut steels during grinding. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal = Engineering Physics Journal*. 2017;90(1):108–115. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Татьяна Николаевна Иванова

доктор технических наук, профессор,
старший научный сотрудник отдела
моделирования и синтеза
технологических структур, Удмуртский
федеральный исследовательский центр
Уральского отделения Российской
академии наук (Россия, г. Ижевск,
ул. им. Татьяны Бaramзиной, 34);
профессор кафедры автоматизации
информационных и инженерных
технологий, Чайковский филиал
Пермского национального
исследовательского политехнического
университета (Россия, г. Чайковский,
ул. Ленина, 73)

E-mail: rsg078829@mail.ru

Tat'yana N. Ivanova

Doctor of engineering sciences, professor,
senior staff scientist of the department
of modeling and synthesis of technological
structures, Udmurt Federal Research Center
of Ural branch of the Russian Academy
of Sciences (34 Tatyany Baramzino
street, Izhevsk, Russia);
professor of the sub-department
of automation of information
and engineering technologies,
Tchaikovsky branch of the Perm National
Research Polytechnic University
(73 Lenina street, Tchaikovsky, Russia)

Геннадий Васильевич Козлов

доктор технических наук, профессор,
директор Политехнического института
Пензенского государственного
университета (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: gvk17@yandex.ru

Gennadiy V. Kozlov

Doctor of engineering sciences, professor,
director of Polytechnic Institute
of Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Александр Юрьевич Муйземнек

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой теоретической
и прикладной механики и графики,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: muyzemnek@yandex.ru

Aleksandr Yu. Muiyemnek

Doctor of engineering sciences, professor,
head of the sub-department of theoretical
and applied mechanics and graphics,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 10.02.2023

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 05.04.2023

Принята к публикации / Accepted 25.05.2023