

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛООВОГО ПРОЦЕССА ПРИ ШЛИФОВАНИИ И ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКЕ

В работе определены основные параметры теплового процесса при шлифовании и лезвийной обработке с учетом распределения тепла, уходящего в образующиеся стружки и обрабатываемую деталь. Установлено, что температура резания и глубина проникновения тепла вглубь поверхностного слоя обрабатываемой детали с течением времени обработки непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к установившимся значениям, определяемым условием теплового насыщения поверхностного слоя обрабатываемой детали. Это связано с тем, что доля тепла, уходящего в обрабатываемую деталь, уменьшается, а доля тепла, уходящего в образующиеся стружки, наоборот, увеличивается. В результате уменьшается время нагрева поверхностного слоя детали по сравнению с временем контакта шлифовального круга с фиксированной плоскостью обрабатываемой детали, что и предопределяет существование ограничений изменения температуры резания и глубины проникновения тепла вглубь поверхностного слоя обрабатываемой детали. Показано, что при шлифовании эти параметры теплового процесса меньше, чем при лезвийной обработке, что связано с меньшей силовой напряженностью процесса резания и большей скоростью резания.

Ключевые слова: шлифование, лезвийная обработка, температура резания, баланс тепла, условное напряжение резания, время обработки, обрабатываемая деталь.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важнейшими научными и практическими задачами. Механическая обработка является наименее энергоемкой среди всего многообразия методов обработки деталей машин, что предопределяет ее широкое практическое применение. В особой мере это относится к методам финишной обработки: шлифованию и лезвийной обработке, обеспечивающих высокие показатели качества и точности обрабатываемых поверхностей в связи с возможностью уменьшения силы и температуры резания. Вместе с тем, с увеличением производительности обработки силовая и тепловая напряженности процесса резания возрастают, что снижает качество и точность обрабатываемых поверхностей. В значительной степени увеличивается температура резания при шлифовании, что приводит к образованию на обрабатываемых поверхностях температурных дефектов. Поэтому проблема уменьшения температуры резания при механической обработке является актуальной, требующей изыскания новых технологических решений на основе исследований тепловых процессов при шлифовании и лезвийной обработке, в особенности при использовании современных металлорежущих станков с ЧПУ типа «обрабатывающий центр» и прогрессивных абразивных и лезвийных инструментов, в частности зарубежного производства, характеризующихся высокими показателями износостойкости и режущей способности. Это позволит добиться существенного повышения производительности и качества обработки. Исследования выполнены в соответствии с тематическим планом научно-практических работ Фирмы «ДиМерус Инженеринг» ООО (г. Харьков).

Анализ последних достижений и публикаций. Проблеме исследования тепловых процессов при шлифовании и лезвийной обработке в научно-технической литературе постоянно уделяется большое внимание, так как от этого зависит качество и производительность механической обработки [1-5]. Причем, проводятся как экспериментальные, так и теоретические исследования, в результате чего разработана классическая теория теплофизики механической обработки, основанная на решении дифференциального уравнения теплопроводности в частных производных для различных начальных и краевых условий. Это позволило теоретически определить параметры тепловых процессов при резании, установить основные условия уменьшения температуры резания и разработать эффективные технологические процессы металлообработки, получившие широкое практическое использование. Однако, для решения конкретных практических задач теплофизики шлифовании и лезвийной обработки необходимо также и применение упрощенных инженерных расчетов, позволяющих более просто произвести расчеты температуры резания при обеспечении высокой сходимости расчетных и экспериментальных данных. Поэтому в настоящей работе получили дальнейшее развитие упрощенные

теоретические подходы к определению температуры резания при шлифовании и лезвийной обработке, предложенные в работе [6].

Цель работы – теоретическое определение условий уменьшения температуры резания при шлифовании и лезвийной обработке с учетом распределения тепла, уходящего в образующиеся стружки и обрабатываемую деталь.

Материалы исследований. В предложенном упрощенном теоретическом подходе [6] к аналитическому определению температуры резания при шлифовании снимаемый припуск представлен в виде пакета элементарных прямолинейных адиабатических стержней, которые в процессе шлифования перерезаются шлифовальным кругом (рис. 1). Рассматривая равномерное движение теплового источника с заданной скоростью $V_{рез}$ вдоль адиабатического стержня, расчетами установлено, что температура резания θ , равная максимальной температуре нагрева адиабатического стержня, с течением времени обработки непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к установившемуся значению, определяемому его тепловым насыщением (рис. 2).

Расчет температуры резания θ произведен на основе уравнения [7]:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot \left(1 - e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot V_{рез}^2 \cdot \tau - c \cdot \rho \cdot \theta}{\lambda}} \right), \quad (1)$$

где σ – условное напряжение резания, Н/м²; λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К; c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К); ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³; τ – время контакта шлифовального круга с адиабатическим стержнем, равное времени его перерезания шлифовальным кругом, с; $V_{рез}$ – скорость перерезания адиабатического стержня шлифовальным кругом, м/с.

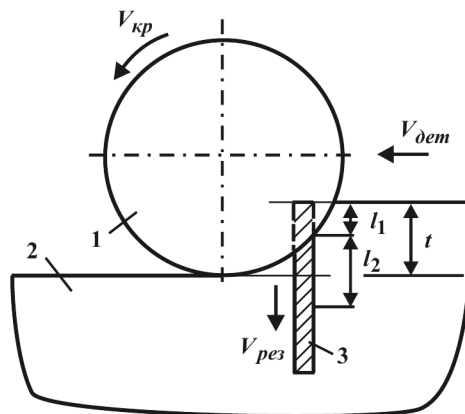


Рис. 1. Расчетная схема параметров теплового процесса при плоском шлифовании: 1 – круг; 2 – деталь; 3 – адиабатический стержень.

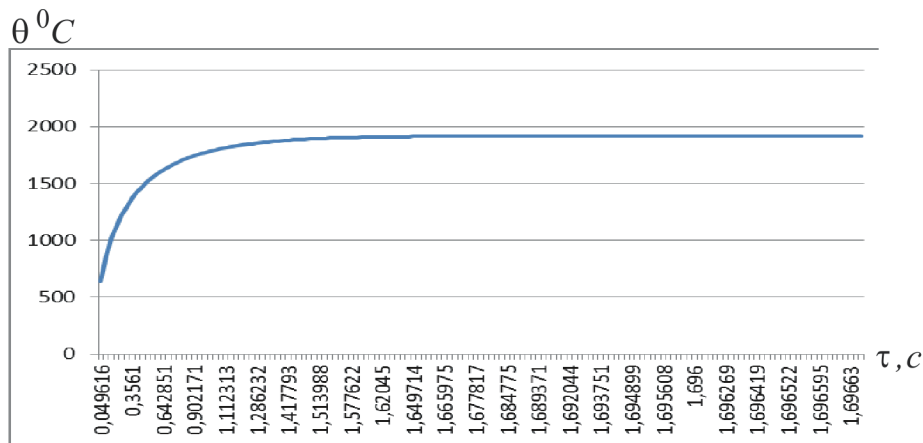


Рис. 2. Зависимость θ от τ

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

Использованы следующие исходные данные для шлифования стали ШХ15 (коэффициент температуропроводности $a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} = 8,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $\lambda = 42 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{градус})$). Расчет условного напряжения резания σ ($\text{Н}/\text{мм}^2$) произведен по зависимости [5]: $\sigma = 2\sigma_{\text{сж}} / K_{\text{рез}}$, где $\sigma_{\text{сж}}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала (для стали ШХ15: $\sigma_{\text{сж}} = 2000 \text{ Н}/\text{мм}^2$); $K_{\text{рез}} = 0,4$ – коэффициент резания при шлифовании. Тогда $\sigma = 10\,000 \text{ Н}/\text{мм}^2 = 10^{10} \text{ Н}/\text{м}^2$. Скорость резания $V_{\text{рез}} = 3,33 \text{ мм}/\text{с}$.

При этом глубина l_{2n} проникновения тепла вглубь адиабатического стержня с течением времени обработки τ также непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к установившемуся значению (рис. 3), и определяется зависимостью [7]:

$$l_{2n} = \frac{\lambda \cdot \theta}{\sigma \cdot V_{\text{рез}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \tau_n}, \quad (2)$$

где τ_n – время нагрева адиабатического стержня при его перерезании шлифовальным кругом, с.

Установившиеся (максимальные) значения температуры резания θ и параметра l_{2n} определяются зависимостями (при условии $\tau \rightarrow \infty$):

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho}; \quad (3)$$

$$l_{2n} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{V_{\text{рез}}}, \quad (4)$$

исходя из условия достижения максимального значения времени нагрева адиабатического стержня при его перерезании шлифовальным кругом:

$$\tau_n = \frac{\lambda}{2 \cdot c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{V_{\text{рез}}^2}. \quad (5)$$

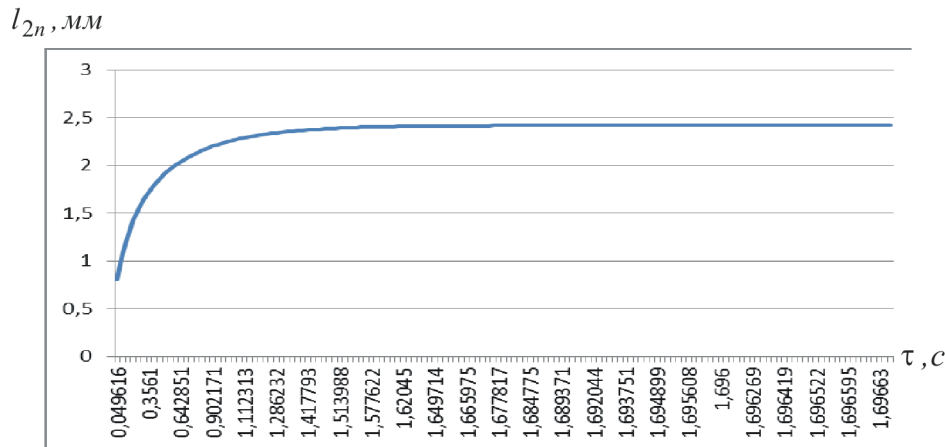


Рис. 3. Зависимость l_{2n} от τ

Установленный характер изменения температуры резания θ и параметра l_{2n} с течением времени обработки τ обусловлен тем, что время τ_n всегда меньше времени τ (рис. 4). Физически это означает, что время $(\tau - \tau_n)$ определяет время нагрева образующихся стружек, а время τ_n – время нагрева адиабатического стержня при его перерезании шлифовальным кругом вследствие теплопроводности материала стержня.

Уравнение баланса тепла, уходящего в образующиеся стружки и адиабатический стержень, принимает вид:

$$Q_{\text{стружка}} + Q_{\text{стержень}} = N \cdot \tau \quad (6)$$

или

$$N \cdot (\tau - \tau_n) + N \cdot \tau_n = N \cdot \tau, \quad (7)$$

где $Q_{стружк} = N \cdot (\tau - \tau_n)$ – количество тепла, уходящего в образующиеся стружки, Дж; $Q_{стерж} = N \cdot \tau_n$ – количество тепла, уходящего в адиабатический стержень, Дж; $N = q \cdot F$ – мощность шлифования, Вт; $q = \sigma \cdot V_{рез}$ – плотность теплового потока, Вт/м²; σ – условное напряжение резания, Н/м²; F – площадь поперечного сечения адиабатического стержня, м².

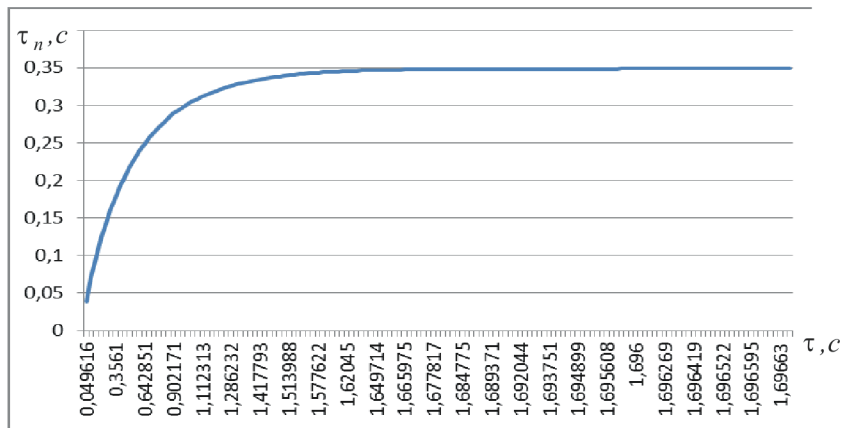


Рис. 4. Зависимость τ_n от τ

Уравнение (7) можно представить в виде

$$\frac{(\tau - \tau_n)}{\tau} + \frac{\tau_n}{\tau} = 1. \quad (8)$$

Первое слагаемое уравнения (8) определяет долю образующегося при шлифовании тепла, уходящего в образующиеся стружки, а второе слагаемое – долю образующегося при шлифовании тепла, уходящего в адиабатический стержень, т.е. в поверхностный слой обрабатываемой детали.

Для удобства расчетов уравнение (1) представлено в виде зависимости для определения времени перерезания адиабатического стержня шлифовальным кругом

$$\tau = -\frac{2}{m} \cdot \sqrt{\tau_n} - \frac{2}{m^2} \cdot \ln(1 - m \cdot \sqrt{\tau_n}), \quad (9)$$

где $m = 2 \cdot V_{рез} \cdot \sqrt{\frac{c \cdot \rho}{2 \cdot \lambda}}$.

Рассмотрены условия плоского шлифования закаленной стали ШХ15 абразивным кругом радиусом $R_{кр} = 0,2$ м, глубиной шлифования $t = 0,01 \cdot 10^{-3}$ м и удельной производительностью обработки $Q_{уд} = 400$ мм²/мин; $V_{рез} = Q_{уд} / \sqrt{2t \cdot R_{кр}} = 3,33$ мм/с; $\sigma = 10^{10}$ Н/м². Задавая значения τ_n , по зависимости (9) можно произвести расчет времени τ , а по зависимостям (1) и (2) – температуры резания θ и параметра l_{2n} .

В табл. 1 приведены расчетные значения отношений $(\tau - \tau_n)/\tau$ и τ_n/τ , определяющих первое и второе слагаемые уравнения (8). Как видно, с увеличением времени τ отношение $(\tau - \tau_n)/\tau$ увеличивается, а отношение τ_n/τ , наоборот, уменьшается. Следовательно, с увеличением времени τ доля тепла, уходящего в образующиеся стружки, увеличивается, а доля тепла, уходящего в адиабатический стержень, уменьшается.

Как видно, характер изменения отношений $(\tau - \tau_n)/\tau$ и τ_n/τ остается таким же, как и при шлифовании, однако абсолютные значения τ и τ_n значительно меньше. Это приводит к уменьшению температуры резания θ и глубины проникновения тепла вглубь адиабатического стержня l_{2n} по сравнению с шлифованием.

В этом случае появляется возможность осуществления на практике установившегося значения температуры резания (рис. 2), что обеспечивает увеличение производительности обработки без увеличения температуры резания и открывает новые перспективы высокопроизводительной и высококачественной обработки. При шлифовании такое условие фактически невыполнимо, т.к. время τ контакта шлифовального круга с фиксированным

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

сечением обрабатываемой детали (время перерезания адиабатического стержня шлифовальным кругом) значительно меньше времени τ_n и температура резания θ не успевает достичь установившегося значения.

Таблица 1

Расчетные значения параметров τ , l_{2n} , θ , $(\tau - \tau_n)/\tau$ и τ_n/τ при шлифовании

τ , с	τ_n , с	l_{2n} , мм	θ , град	$(\tau - \tau_n)/\tau$	τ_n/τ
0,030323	0,025	0,648267	513,8701	0,175552	0,824448
0,066795	0,05	0,916788	726,7221	0,251435	0,748565
0,108916	0,075	1,122831	890,0492	0,311393	0,688607
0,157085	0,1	1,296534	1027,74	0,363402	0,636598
0,212078	0,125	1,449569	1149,049	0,410595	0,589405
0,275043	0,15	1,587923	1258,72	0,454631	0,545369
0,347606	0,175	1,715153	1359,573	0,496556	0,503444
0,432091	0,2	1,833576	1453,444	0,537135	0,462865
0,531923	0,225	1,944801	1541,61	0,577006	0,422994
0,652395	0,25	2,05	1625	0,616797	0,383203
0,802292	0,275	2,150058	1704,314	0,657232	0,342768
0,997788	0,3	2,245662	1780,098	0,699335	0,300665
1,274021	0,325	2,33736	1852,785	0,744902	0,255098
1,735189	0,35	2,425593	1922,726	0,798293	0,201707
3,266376	0,375	2,510727	1990,21	0,885194	0,114806

В табл. 2 приведены расчетные значения отношений $(\tau - \tau_n)/\tau$ и τ_n/τ для процесса точения с учетом исходных данных: $V_{рез} = 2,92$ м/с; $\sigma = 0,346 \cdot 10^{10}$ Н/м².

Таблица 2

Расчетные значения параметров τ , l_{2n} , θ , $(\tau - \tau_n)/\tau$ и τ_n/τ при точении

τ , с	τ_n , с	l_{2n} , мм	θ , град	$(\tau - \tau_n)/\tau$	τ_n/τ
0,00000006	0,00000005	0,000917	172,9947	0,170594	0,829406
0,00000013	0,0000001	0,001297	244,6515	0,244215	0,755785
0,00000021	0,00000015	0,001588	299,6357	0,302303	0,697697
0,00000031	0,0000002	0,001834	345,9895	0,352609	0,647391
0,00000042	0,00000025	0,00205	386,828	0,39817	0,60183
0,00000054	0,0000003	0,002246	423,7488	0,440582	0,559418
0,00000067	0,00000035	0,002426	457,7011	0,480842	0,519158
0,00000083	0,0000004	0,002593	489,303	0,519659	0,480341
0,00000102	0,00000045	0,00275	518,9842	0,557603	0,442397
0,00000124	0,0000005	0,002899	547,0574	0,595196	0,404804
0,00000150	0,00000055	0,003041	573,7586	0,632994	0,367006
0,00000183	0,0000006	0,003176	599,2714	0,671688	0,328312
0,00000226	0,00000065	0,003306	623,7414	0,712311	0,287689
0,00000288	0,0000007	0,00343	647,287	0,756774	0,243226
0,00000395	0,00000075	0,003551	670,0057	0,810045	0,189955

Поэтому температура резания θ с увеличением времени τ будет увеличиваться до определенного значения, которое меньше установившегося значения. В связи с этим, с определенными физическими допущениями расчет температуры резания θ при шлифовании можно производить без учета перерезания адиабатического стержня шлифовальным кругом и перемещения теплового источника вглубь адиабатического стержня, т.е. рассматривая справедливым условие $\tau = \tau_n$ во всем диапазоне изменения времени τ . Несомненно, это приведет к некоторому увеличению температуры резания θ , поскольку все выделяющееся при шлифовании тепло будет уходить в обрабатываемую деталь. Полученные теоретические решения использованы при разработке и внедрении в производство на ряде предприятий Украины эффективных технологических процессов механической обработки высокоточных деталей.

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ПРИЛАДИ

Выводы. В работе определены основные параметры теплового процесса при шлифовании и лезвийной обработке с учетом распределения тепла, уходящего в образующиеся стружки и обрабатываемую деталь. Установлено, что температура резания и глубина проникновения тепла вглубь поверхностного слоя обрабатываемой детали с течением времени обработки непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к установившимся значениям, определяемым условием теплового насыщения поверхностного слоя обрабатываемой детали. Это связано с тем, что доля тепла, уходящего в обрабатываемую деталь, уменьшается, а доля тепла, уходящего в образующиеся стружки, наоборот, увеличивается. В результате уменьшается время нагрева поверхностного слоя детали по сравнению с временем контакта шлифовального круга с фиксированной плоскостью обрабатываемой детали, что и предопределяет существование ограничений изменения температуры резания и глубины проникновения тепла вглубь поверхностного слоя детали. Показано, что при шлифовании эти параметры теплового процесса меньше, чем при лезвийной обработке, что связано с меньшей силовой напряженностью процесса резания и большей скоростью резания.

Перспективы дальнейшей работы в данном направлении. В дальнейшей работе следует провести анализ влияния силовой напряженности процесса резания на условиях формирования температуры резания, т.е. установить функциональные связи между условным напряжением резания и основными параметрами процесса резания для различных схем механической обработки и на этой основе оценить закономерности изменения температуры резания.

Информационные источники

1. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
2. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
3. Евсеев Д.Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке / Д.Г. Евсеев. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 127 с.
4. Сизый Ю.А. Динамика и теплофизика шлифования / Ю.А. Сизый, Д.В. Сталинский. – Х.: ГП «УкрНТЦ «Энергосталь», 2016. – 448 с.
5. Теоретические основы резания и шлифования материалов: учеб. пособие / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков, Б. С. Серов, А.А. Якимов. – Одесса : ОГПУ, 1999. – 450 с.
6. Новиков Ф.В. Повышение эффективности технологии финишной обработки деталей пар трения поршневых насосов / Ф.В. Новиков, С.М. Яценко // Физические и компьютерные технологии: междунар. Научн.-техн. конф., 19-20 апреля 2007 г.: труды – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2007. – С. 8-20.
7. Кленов О.С. Расчет и анализ температуры резания при шлифовании / О.С. Кленов, Ф.В. Новиков, И.В. Гершиков, А.А. Андилахай // Вісник Приазовського державного технічного університету. Сер.: Технічні науки: Зб. наук. праць. – Маріуполь: ДВНЗ «Приазов. держ. техн. ун-т», 2015. – Вип. 31. – 2015. – С. 118–125.

Кленов О.С., к.т.н.

Фірма «ДіМерус Інженеринг» ТОВ, м. Харків

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛООВОГО ПРОЦЕСУ ПРИ ШЛІФУВАННІ ТА ЛЕЗОВІЙ ОБРОБЦІ

В роботі визначено основні параметри теплового процесу при шліфуванні та лезовій обробці з урахуванням розподілу тепла, що йде в стружки, що утворюються, й оброблювану деталь. Встановлено, що температура різання й глибина проникнення тепла вглиб поверхневого шару оброблюваної деталі з часом обробки безперервно збільшуються, асимптотичне наближаються до усталених значень, що визначаються умовою теплового насичення поверхневого шару оброблюваної деталі. Це пов'язано з тим, що частка тепла, що йде в оброблювану деталь, зменшується, а частка тепла, що йде в стружки, що утворюються, навпаки, збільшується. В результаті зменшується час нагріву поверхневого шару деталі порівняно з часом контакту шліфувального круга з фіксованою площиною оброблюваної деталі, що і зумовлює існування обмежень зміни температури різання й глибини проникнення тепла вглиб поверхневого шару оброблюваної деталі. Показано, що при шліфуванні ці параметри теплового процесу менше, ніж при лезовій обробці, що пов'язано з меншою силовою напруженістю процесу різання і більшою швидкістю різання.

Ключові слова: шліфування, лезова обробка, температура різання, баланс тепла, умовне напруження різання, час обробки, оброблювальна деталь.

О. Klenov

Firm "DiMerus Engineering" LLC, Kharkov

DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF THERMAL PROCESS AT SANDING AND FORESTRY TREATMENT

The main parameters of the thermal process during grinding and blade processing are determined taking into account the heat distribution that goes into the formed chips and the workpiece. It is established that the cutting temperature and the depth of penetration of heat into the surface layer of the workpiece with the processing time increase continuously, asymptotically approaching the steady-state values determined by the condition of thermal saturation of the surface layer of the workpiece. This is due to the fact that the proportion of heat leaving into the workpiece decreases, and the proportion of heat leaving into the formed chips, on the contrary, increases. As a result, the heating time of the surface layer of the part decreases as compared with the contact time of the grinding wheel with the fixed plane of the workpiece, which predetermines the existence of limitations on the cutting temperature and the depth of penetration of heat deep into the surface layer of the workpiece. It is shown that when grinding these parameters of the thermal process are less than in the case of blade cutting, which is associated with a lower strength of the cutting process and a higher cutting speed.

Key words: grinding, blade processing, cutting temperature, heat balance, conditional cutting stress, machining time, workpiece.