

д) при указанном выше размере кристаллов хрома достигается полное копирование покрытием микрорельефа поверхности инструмента, что значительно увеличивает предельные напряжения сдвигового и нормального отрыва покрытия от основы;

е) покрытия не отслаиваются от стальной основы при температуре до 1018°C;

ж) покрытия обладают повышенной коррозионной стойкостью и отражательной способностью.

Для целесообразности внедрения в производство данного способа повышения стойкости рамных пил были проведены производственные испытания на ОАО «Минскдрев». Постав пил собирался из неупрочненных и упрочненных пил таким образом, чтобы обеспечить равноценные режимы работы их эксплуатации.

Замеры затупления режущих элементов показывают, что стойкость упрочненных пил по сравнению с неупрочненными выше в 2,0–3,0 раза. Такие значительные расхождения вызваны отсутствием однотипных распиливаемых материалов как по породам, так и режимам обработки.

По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы:

а) исследований стойкостных показателей по упрочнению режущих элементов с использованием углеродных (алмазных) составляющих, введенных в электролит хромирования для механической обработки древесных материалов, не производилось;

б) метод упрочнения с изменением поверхностного слоя хромированием с углеродными составляющими позволяет получить покрытия со свойствами, приемлемыми к специфическим условиям эксплуатации дереворежущего инструмента.

в) метод упрочнения хромированием с углеродными составляющими позволяет повысить стойкость, что значительно сокращает расход пил и трудозатраты на их подготовку к работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зотов Г.А., Памфилов Е.А. Повышение стойкости дереворежущего инструмента. – М.: Экология, 1991.

УДК 674.023:621.793

А.К. Вершина, д-р техн. наук (ФТИ НАНБ); Н.В. Бурносков, доцент;  
И.И. Бавбель, ст. преподаватель

#### **ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕПЛОПРОВОДНОГО ПОКРЫТИЯ НА ТЕМПЕРАТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ ДИСКОВ КРУГЛЫХ ПИЛ**

Influence high-heating conductivity coverage on temperature condition of disks of round saws.

Температурный режим работы дереворежущего инструмента, и в частности круглых дисковых пил, является одним из основных технологических факторов, определяющих его работоспособность. Именно значительные температурные нагрузки инструмента при обработке древесины, обуславливающие возникновение усталостных

напряжений и знакопеременных циклических нагрузок, служат основной причиной износа. Применение традиционных известных методов повышения режущих свойств деревообрабатывающего инструмента путем его сложного легирования в настоящее время ограничено из-за дефицита ряда химических элементов. Кроме того, в ряде случаев этот путь не дает требуемых результатов. Поэтому в последнее время в мировой практике все большее применение находят методы повышения работоспособности инструмента путем нанесения соответствующих функциональных покрытий. Эти методы обладают высокой производительностью, универсальностью, экономичностью. Появляется возможность управления условиями формирования и свойствами покрытий, а также свойствами композиции покрытие – инструментальный материал. Кристаллохимические, физико-механические и теплофизические свойства покрытий на поверхностях режущего инструмента могут сильно отличаться от соответствующих показателей инструментального материала [1]. Поэтому покрытие способно заметно улучшить свойства инструментального материала с точки зрения повышения его сопротивляемости микро- и макроразрушению. Применение высокотеплопроводных покрытий для деревообрабатывающего инструмента может способствовать уменьшению контактных нагрузок, снижению мощности тепловых источников и благоприятному перераспределению тепловых потоков, тем самым уменьшая термохимическую напряженность режущей части инструмента.

*Целью настоящей работы* является исследование эффективности применения высокотеплопроводных покрытий, обеспечивающих повышение износостойкости круглопильного дереворежущего инструмента и теплоотвода из зоны резания. Аналитическое описание температурных полей, формируемых в дереворежущем круглопильном инструменте, наиболее полно представлено в работах [2-3]. Однако приведенные результаты относятся к инструменту без покрытий. Для оценки влияния высокотеплопроводного покрытия на температурное состояние дереворежущего инструмента рассмотрим теплофизическую задачу в следующей постановке.

Предположим, что имеется диск круглой пилы толщиной  $2R$ , на обе стороны которого нанесено покрытие толщиной  $h = l - R$ . Начальная температура композиции постоянна и равна  $t_0$ . В начальный момент времени система помещается в среду с постоянной температурой  $t_c < t_0$ . Между ограничивающими поверхностями покрытия и окружающей средой происходит теплообмен по закону Ньютона. Требуется найти распределение температуры по толщине диска и покрытия (рис. 1).

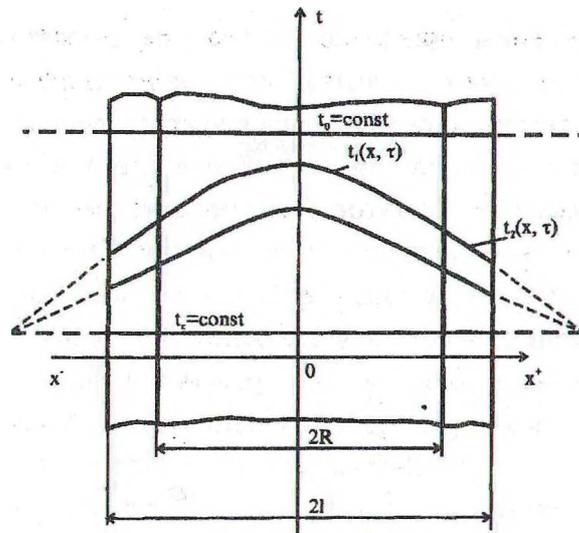


Рис. 1. Распределение температуры по толщине диска пилы и покрытия

Полагаем, что теплофизические характеристики материалов диска и покрытия различны и не зависят от температуры, а формирование температурного поля в рассматриваемой тепловой системе осуществляется по закону теплопроводности. При сделанных предположениях задача сводится к отысканию решения системы дифференциальных уравнений теплопроводности вида

$$\frac{\partial t_1(x, \tau)}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 t_1(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, -R < x < R, \quad (1)$$

$$\frac{\partial t_2(x, \tau)}{\partial \tau} = a_2 \frac{\partial^2 t_2(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, -R < |x| < l, \quad (2)$$

при следующих краевых условиях:

$$t_1(x, 0) = t_2(x, 0) = t_0, \quad t_c < t_0 \quad (3)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial t_2(-l, \tau)}{\partial x} + \alpha [t_2(l, \tau) - t_c] = 0, \quad (4)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial t_2(-l, \tau)}{\partial x} + \alpha [t_2(-l, \tau) - t_c] = 0, \quad (5)$$

$$\pm \lambda_1 \frac{\partial t_1(\pm R, \tau)}{\partial x} = \pm \lambda_2 \frac{\partial t_2(\pm R, \tau)}{\partial x}, \quad (6)$$

$$t_1(\pm R, \tau) = t_2(\pm R, \tau). \quad (7)$$

Здесь  $t_i(x, \tau)$  – температура  $i$ -го ( $i=1, 2$ ) тела (индексом  $i=1$  обозначены величины, относящиеся к диску,  $i=2$  – к покрытию) в точке  $x$  в момент времени  $\tau$ ;  $a_i, \lambda_i$  – соответственно коэффициенты температуропроводности и теплопроводности,  $\alpha$  – коэффициент теплообмена.

Теплообмен между свободными поверхностями покрытия и окружающей средой осуществляется с обеих сторон рассматриваемой системы одинаково, поэтому условия (5) можно записать

$$\frac{\partial \alpha_1(0, \tau)}{\partial x} = 0,$$

а условия (6) и (7) рассматривать лишь для положительных значений  $R$ .

Аналитическое решение задачи в приведенной постановке (1) – (7) имеет следующий вид [6]:

$$T_1(x, \tau) = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n \varphi_n} \cos\left(\mu_n \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} x/h\right) \exp\left(-\mu_n^2 \frac{R^2}{h^2} \frac{a_2}{a_1} \frac{a_{1t}}{R^2}\right), \quad (8)$$

$$T_2(x, \tau) = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n \varphi_n} \left[ \cos\left(\mu_n \frac{x-R}{h}\right) \cos\mu_n \left(\sqrt{\frac{a_2}{a_1}} \frac{R}{h}\right) - K_s \sin\left(\mu_n \frac{x-R}{h}\right) \sin\mu_n \left(\sqrt{\frac{a_2}{a_1}} \frac{R}{h}\right) \right] \exp\left(-\mu_n^2 \frac{a_2}{h_2} \tau\right), \quad (9)$$

$$\text{где } T_1(x, \tau) = \frac{t_0 - t_1(x, \tau)}{t_0 - t_c}; \quad K_s = \frac{\sqrt{\lambda_1 c_1 \gamma_1}}{\sqrt{\lambda_2 c_2 \gamma_2}} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}};$$

$$\varphi_n = \left[ \left( 1 + K_s \frac{R}{h} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} + \frac{1 + \frac{R}{h}}{B_1} \right) \sin\mu_n + \mu_n \frac{1 + \frac{R}{h}}{B_1} \left( 1 + K_s \frac{R}{h} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} \right) \cos\mu_n \right] \cos\mu_n \frac{R}{h} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} + \left[ \left( 1 + K_s^{-1} \frac{R}{h} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} + \frac{1 + \frac{R}{h}}{B_1} \right) \cos\mu_n - \mu_n \frac{1 + \frac{R}{h}}{B_1} \left( 1 + K_s^{-1} \frac{R}{h} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} \right) \sin\mu_n \right] K_s \sin\left(\mu_n \frac{R}{h} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}}\right), \quad (10)$$

$\mu_n$  – корни характеристического уравнения.

$$K_s \frac{\mu}{B_1} \left( 1 + \frac{R}{h} \right) \operatorname{tg} \left( \mu \frac{R}{h} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} \right) = 1 - \frac{\mu}{B_1} \left( 1 + \frac{R}{h} \right) \operatorname{tg} \mu - K_s \operatorname{tg} \mu \operatorname{tg} \left( \mu \frac{R}{h} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} \right), \quad (11)$$

$$B_1 = \frac{\alpha_1}{\lambda_1} - \text{критерий Био.}$$

Проанализируем влияние геометрических размеров (толщин) диска и покрытия и теплофизических свойств материалов композиции диск – покрытие на ее температурный режим. С этой целью проведем расчеты по формулам (8)–(11), приняв, что диск пилы выполнен из стали 45 [ $\lambda_1 = 48 \cdot 10^{-2}$  Вт/(мм·°С),  $a_2 = 13,1$  мм<sup>2</sup>/с] [7], а в качестве высокотеплопроводного покрытия используются медь [ $\lambda_2 = 39 \cdot 10^{-1}$  Вт/(мм·°С),  $a_2 = 178,1$  мм<sup>2</sup>/с], никель [ $\lambda_2 = 65,6 \cdot 10^{-2}$  Вт/(мм·°С),  $a_2 = 36,6$  мм<sup>2</sup>/с] и углерод в аллотропической модификации графита [ $\lambda_2 = 70 \cdot 10^{-2}$  Вт/(мм·°С),  $a_2 = 36,7$  мм<sup>2</sup>/с] [8]. Предположим

далее, что толщина диска пилы  $2R=2,8$  мм, а толщина покрытия варьируется в пределах от 0 до 10 мкм. Начальную температуру окружающей среды  $t_c$  примем равной  $20^\circ\text{C}$ .

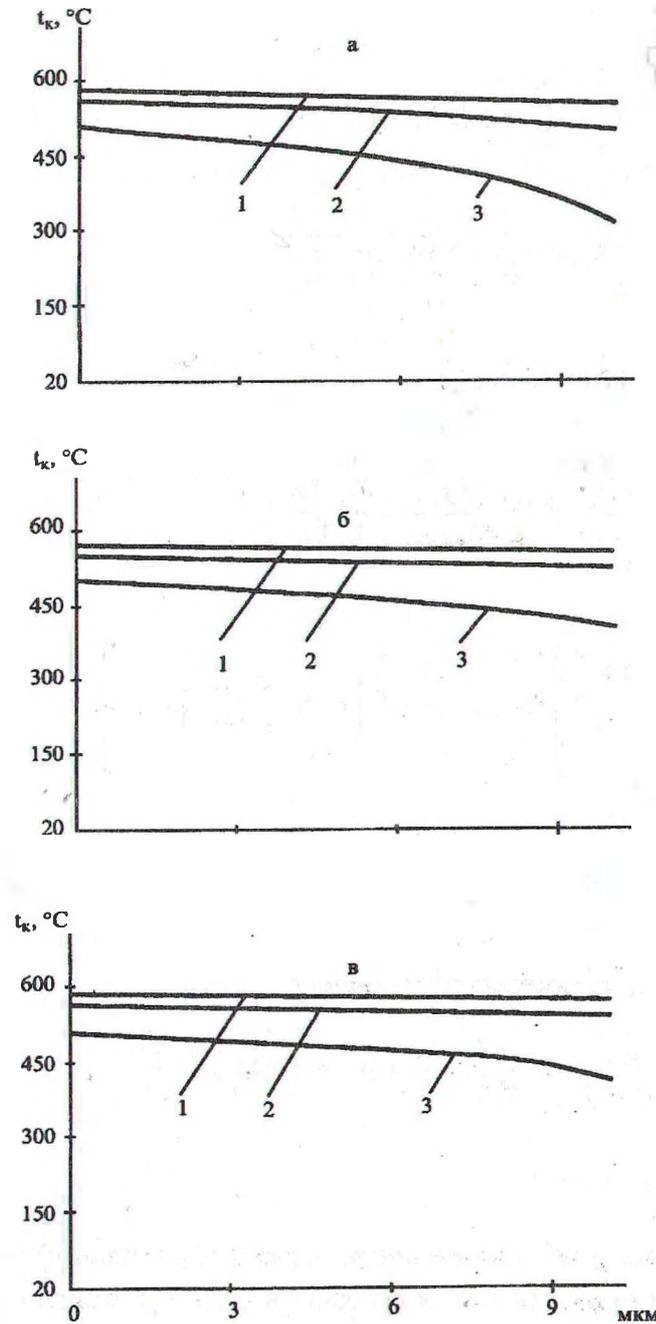


Рис. 2. Зависимость температуры  $t_k$  на контакте диска пилы и покрытия от толщины покрытия 1 (а, б, в – материал покрытия Cu, Ni, C соответственно) в моменты времени 0,1 (1), 1 (1), 10 (3)

На рис. 2 приведены расчетные данные, иллюстрирующие зависимости температуры на контакте диска пилы и покрытия наиболее ответственной области в плане возникновения опасных температурных напряжений – от времени охлаждения инструмента и толщины покрытия, выполненного из различных материалов. Из рассмотрения представленных результатов следует – что наиболее эффективным высокотеплопроводным покрытием является медное, позволяющее существенно снизить температуру инструмента за достаточно короткий временной интервал. Влияние покрытий, выполненных из меди и углерода, на температурное состояние диска пилы примерно равнозначное. Однако предпочтение в данном случае следует отдать никелевому покрытию вследствие более высокой технологичности процесса ионно-плазменного осаждения конденсатов из данного материала. С увеличением толщины высокотеплопроводного покрытия его влияние на скорость охлаждения инструмента растет. Причем с увеличением времени охлаждения это влияние становится существенным (рис. 2, зависимость 3). Следовательно, с точки зрения эффективности теплового влияния покрытия его толщина должна быть по возможности большей. Однако решение об оптимальности толщины высокотеплопроводного покрытия должно приниматься с учетом возможностей метода его формирования и непосредственно результатов стойкостных испытаний дереворежущего инструмента [9].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.
2. Грубе А.Э., Санев В.И., Пашков В.К. К вопросу о температурном поле дисковых пил для продольной распиловки древесины // Лесной журнал. – 1966. – № 3. – С. 92–104.
3. Грубе А.Э., Санев В.И., Пашков В.К. Характер изменения температуры по радиусу дисковых пил и влияние температурного перепада на их поперечные колебания // Лесной журнал. – 1967. – № 4. – С. 60–66.
4. Пашков В.К., Абельский Б.Ш. О температурном поле вращающихся гибких дисков // Инженерно-физический журнал. – 1971. – № 2. – С. 52–55.
5. Красиков А.С., Пашков В.К. Тепловое поле вращающегося охлаждаемого диска пилы // Деревообрабатывающие станки, инструменты и вопросы резания древесины. – Л.; ЛТА, 1984. – С. 48–51.
6. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
7. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Справочник. – М.: Атомиздат, 1968. – 484 с.
8. Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008с.
9. Бурносов Н.В., Бавбель И.И., Вершина А.К. Высокотеплопроводные износостойкие покрытия для круглопильного дереворежущего инструмента // Труды БГТУ. Сер. лесн. и деревообр. пром-ти. – 2001. Вып. IX. – С. 116–118.