

УДК 622.24.051:536.2:004.942

**А. Л. Майстренко**, чл. – кор. НАН України; **В. А. Дутка**, канд. техн. наук;  
**В. М. Колодніцький**, канд. фіз.-мат. наук; **В. А. Лукаш**, канд. техн. наук;  
**Л. М. Вировець**, інженер

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ, Україна*

## **ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИСОКОЇ МІЦНОСТІ РІЗЦІВ З ТВЕРДОСПЛАВНИМИ ВСТАВКАМИ НА ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ІНДУКЦІЙНОГО ПАЯННЯ**

*A computer model of induction brazing of carbide cutters is presented. With this model numerical studies of a temperature field in a carbide insert and in a body of the cutter in the process of soldering the insert to the body are performed. For the process of induction brazing of cemented carbide tools optimum configuration of an inductor and the heating conditions are determined which ensure high wear resistance and strength of the cutters after their subsequent hardening. The results of calculations of the temperature distribution in the volume of a cutter and the curves of the change in temperature at control points of a cutter are given.*

Для будівництва та ремонту доріг з твердим покриттям застосовують дорожно-фрезерні машини, які оснащені різцями з твердосплавними вставками [1]. Особливістю дорожніх різців (рис. 1) є те, що вони є інструментами обертального типу. При роботі такого інструменту зусилля різання формує складову, яка створює крутильний момент; в той же час процес фрезерування асфальтобетонного покриття супроводжується значними ударними навантаженнями. Щоб запобігти виходу із ладу різця через відрив твердосплавної вставки 1 під дією великих навантажень, необхідно проводити паяння твердосплавної вставки до сталювого корпусу 2 різця таким чином, щоб забезпечити необхідну міцність утримання двох матеріалів. Крім того, для досягнення високої зносостійкості різця потрібно забезпечити також високу стійкість корпусу різця при абразивному зношуванні.

Припаювання вставки до корпусу різця здійснюють з використанням індукційного нагріву вставки та корпусу різця. Для отримання готових різців із високою зносостійкістю доцільно в процесі нагріву дотримуватись певних умов. Нагрівання треба здійснювати так, щоб забезпечити якісне припаювання вставки до корпусу, тобто в зоні контакту вставки і корпусу досягнути рівня температури в діапазоні між величинами солідусу та ліквідусу для припою, що використовується. Як показує практика, при виготовленні корпусу із сталі (сталь 35ХГСА) для досягнення його високої міцності при достатній в'язкості необхідно забезпечити твердість корпусу в зоні його контакту зі твердосплавною вставкою (твердий сплав ВК8) на рівні 45 HRC з плавним зменшенням твердості до 40 HRC в зоні пояса 3. Для цього в кінці процесу нагріву потрібно дотримати плавну зміну температури на поверхні корпусу різця від 900 °C в зоні його контакту зі вставкою до 750 °C в зоні хвостовика. Для збереження високої стійкості твердосплавної вставки різця швидкість нагрівання не повинна перевищувати 80 град/с. З іншого боку, занадто довга тривалість нагріву спряжена зі значними ресурсовитратами.

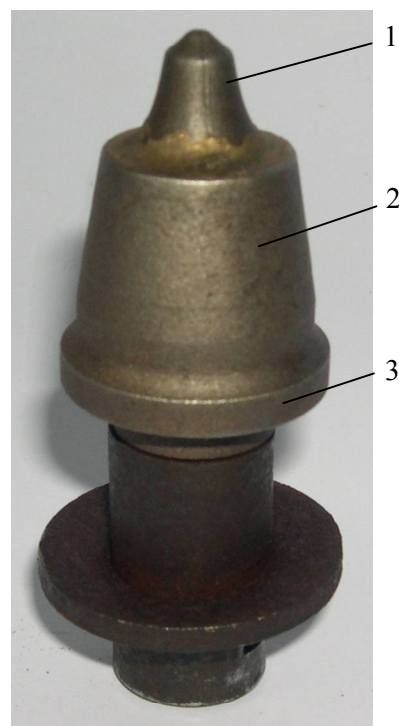


Рис. 1. Різець для дорожно-фрезерних машин.

Дотримання всіх вказаних вище умов можна досягнути шляхом вибору конфігурації індуктора та режимів нагріву. Очевидно, що для оперативного виконання такого завдання доцільно використати математичне моделювання процесу індукційного припаювання вставки до корпусу різця. В даній роботі представлено математичну модель, побудовану на базі числової методики [2] розв'язання нелінійних задач індукційного нагріву, та одержані на її основі результати чисельного дослідження температурного поля в об'ємі різця.

Розрахункова схема (половина меридіонального перетину технологічного вузла) представлена на рис. 2. Розглядається осесиметрична модель електромагнітного та температурного полів. За характеристику електромагнітного поля вибрано вектор напруженості електричного поля  $\mathbf{E}$ , котрий в даному випадку має лише одну ненульову компоненту – кругову. Під дією електромагнітного поля індуктора в об'ємах електропровідних вставки та корпусу різця циркулюють струми Фуко, котрі приводять до виникнення джоулевих джерел тепла. Дія останніх спонукає до зростання температури у вставці та корпусі різця. В результаті цього змінюються електро- та теплофізичні властивості матеріалів вставки та корпусу різця. Відповідно цьому математична модель індукційного нагріву складається зі зв'язаної системи нелінійних рівнянь електромагнітного поля та теплопровідності

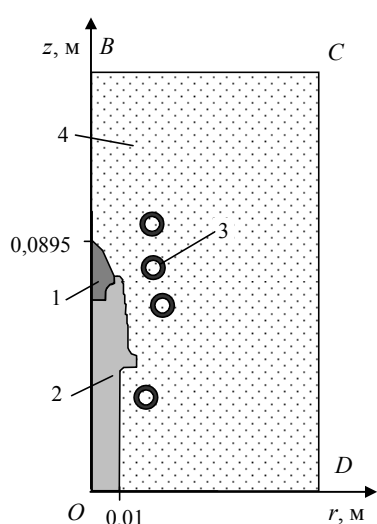


Рис. 2. Розрахункова схема індукційного нагріву: 1 – вставка різця (твердий сплав ВК8); 2 – корпус різця (сталь 35ХГСА); 3 – витки індуктора (мідь); 4 – навколишній повітряний простір.

магнітна проникність матеріалів вставки та корпусу різця є функціями температури:  $c = c(T)$ ,  $\lambda = \lambda(T)$ ,  $\gamma = \gamma(T)$ ,  $\mu = \mu(T)$ . Границю розрахункової області  $BCD$  для визначення характеристик електромагнітного поля вибирали на такій відстані від джерел поля (індуктора), щоб в її точках електромагнітне поле було практично відсутнім (в обчисленнях модуль вектора напруженості електричного поля в указаних точках був на два порядки менший, ніж в точках індуктора).

Задача (1)–(7) розв'язується методом скінченних елементів у поєднанні з методом Буннова-Гальоркіна та двокроковою різницевою схемою в часі. З метою отримання достатньо точних чисельних розв'язків скінченноелементну дискретизацію просторової області проводили таким чином, що приповерхневий шар в корпусі і вставці, товщина якого дорівнює гли-

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu}\operatorname{rot}\mathbf{E}\right) - i\omega\mathbf{J} = \mathbf{0}, \quad (1)$$

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda\operatorname{grad}T) + Q, \quad (2)$$

$$\mathbf{J} = \gamma\mathbf{E}, \quad Q = 0,5\gamma\mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^* \quad (3)$$

$$\text{із такими початковими} \\ \mathbf{E} = \mathbf{0}, \quad T = 20^\circ\text{C при } t = 0, \quad (4)$$

та граничними умовами:

$$\text{на границі } BCD \\ \mathbf{E} = \mathbf{0}, \quad (5)$$

на поверхні вставки та корпусу різця

$$\lambda\frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T_c - T) \quad (6)$$

В місці знаходження витків індуктора задається джерело електромагнітного поля – густина діючого електричного струму в обмотці індуктора

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_0. \quad (7)$$

Оскільки нагрівання триває в межах однієї хвилини, то на поверхні  $z=0$  (границя контакту з термостійкою цеглиною, на якій знаходиться корпус різця) розрахункової області прийнята умова відсутності теплового потоку. В рівнянні (1) через  $i$  позначено уявну одиницю, а  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  – де частота струму. Питома теплоємність, коефіцієнти тепло- і електропровідності та

бині проникнення електричного струму, розбивався на два ряди елементів; з віддаленням від вказаного шару і від витків індуктора розміри скінченних елементів поступово збільшувались.

В обчисленнях значення електро- і теплофізичних властивостей матеріалів приймалися згідно із даними [3–5]; величину коефіцієнта конвективного теплообміну на зовнішніх поверхнях вставки та корпусу різця було розраховано за методикою, приведеною в [6]. Обчислення характеристик електромагнітного та температурного полів виконано для таких параметрів: діаметр трубки індуктора – 0,008 м, товщина стінки трубки індуктора – 0,001 м, величина сили та частоти діючого електричного струму в індукторі, відповідно, 550 А та 66 кГц, величина коефіцієнта конвективного теплообміну  $\alpha = 30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$ .

З метою забезпечення описаних вище технологічних умов було проведено серію чисельних експериментів для різних конфігурацій індуктора та величин сили електричного струму в індукторі. При цьому проводився аналіз як розподілу температури в різці, так і зміни в часі температури в окремих – контрольних – точках об'єму різця. В результаті вказаних експериментів отримано оптимальну конфігурацію індуктора, яка зображена на рис. 2. Саме для даної конфігурації індуктора проведено чисельне дослідження теплового поля різця, що виникає в процесі індукційного нагріву. Аналіз показав, що в залежності від характеру розподілу температури у вставці та корпусі різця весь проміжок часу нагріву  $[0; t_H]$  до досягнення в зоні припаювання температури 800–900 °С можна умовно розбити на три інтервали:  $[0; t_1]$ ,  $[t_1; t_2]$  та  $[t_2; t_H]$ .

Перший інтервал  $[0; t_1]$  триває від початку нагрівання і практично до моменту досягнення на поверхні сталевого корпусу рівня температури Кюрі (для сталі 35ХГСА вона становить 760 °С). Протягом цього інтервалу в корпусі різця спостерігається сильно виражений поверхневий ефект, в результаті якого в тонкому приповерхневому шарі різця діють потужні джерела тепла, котрі приводять до швидкого нагріву приповерхневого шару (рис. 3, а). Внаслідок цього температурне поле в об'ємі корпусу різця від зони припаювання вставки до пояса є сильно неоднорідним. Середня швидкість нагріву різця (швидкість зростання рівня температури) на даному інтервалі є найбільшою.

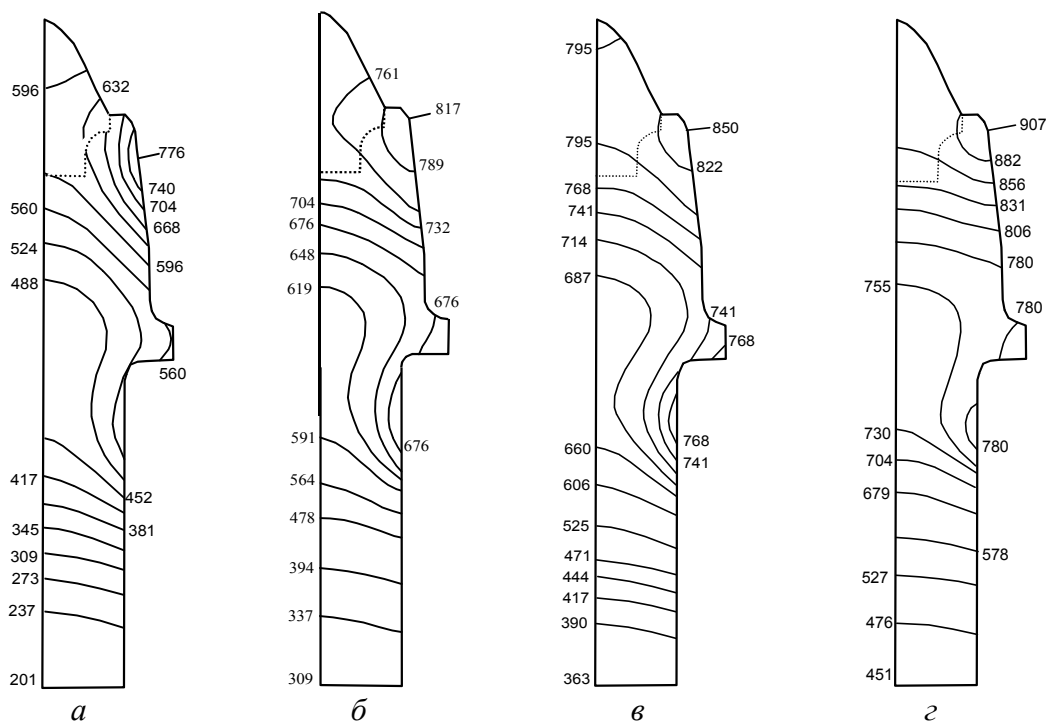


Рис. 3. Розподіл температури у вставці та в корпусі різця при його індукційному нагріві в моменти часу 22 (а), 30 (б), 35 (в) та 45 (з) с.

Другий інтервал  $[t_1; t_2]$  значно коротший від першого і триває практично до десяти секунд (в даному випадку  $t_2 = 35$  с). Відмінним для цього інтервалу є значне зниження (наприклад, майже вдвічі на момент  $t = 30$  с) перепаду температури як в радіальному, так і в осьовому напрямках у вказаній вище частині об'єму корпусу різця. Для цього інтервалу характерна перехідна картина теплового поля у корпусі різця (див. рис. 3, б) від різко нагрітого приповерхневого шару до його внутрішньої області з практично усталеним характером розподілу температури. Протягом даного інтервалу різко знижується швидкість нагріву вставки та корпусу різця.

Для третього інтервалу  $[t_2; t_n]$ , довжина якого становить десятки секунд (в даному випадку  $t_n = 45-60$  с), є характерною майже усталена картина розподілу теплового поля у вставці і в корпусі різця та практично незмінний перепад температури вздовж поверхні корпусу різця від зони припаювання вставки до пояса (рис. 3, в, з). Швидкість нагріву вставки та корпусу різця протягом даного інтервалу найнижча зі всіх трьох інтервалів. Всі зазначені обставини на практиці дають змогу успішно вибрати сприятливий момент часу для закінчення процесу паяння.

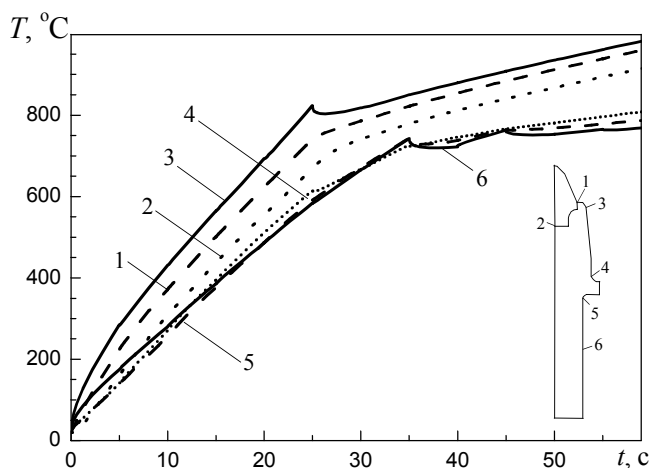


Рис. 4. Зміна в часі температури в контрольних точках об'єму різця.

мірі двома такими обставинами. По-перше, при досягненні температури Кюрі  $760$  °C різко зростає (майже вдесятеро) глибина проникнення електромагнітного поля в корпусі різця, внаслідок чого теплові джерела діють в більшій товщині приповерхневого шару корпусу, однак їх потужність вже значно менша, ніж до цього моменту часу. По-друге, коефіцієнт теплопровідності сталі 35ХГСА залежить від температури відповідно закону, близькому до параболічного, і досягає мінімуму біля  $800$  °C [3, 4]. При подальшому зростанні температури із збільшенням коефіцієнта теплопровідності теплова енергія в корпусі різця поширюється швидше.

Аналіз теплового поля різця (див. рис. 3) свідчить, що температура всіх точок поверхні припаювання вставки до корпусу різця практично знаходиться в діапазоні температур, які досягаються в точках 1 і 2 (див. рис. 4). Перепад температур в точках 1 і 2 припою на заключній стадії нагріву – протягом третього із вказаних вище інтервалів часу – не перевищує  $50$  градусів, і із зростанням часу не збільшується, що, враховуючи діапазон між лініями солідусу та ліквідусу для припою, є важливим для якісного припаювання вставки до корпусу різця.

### Висновки

Запропоновано комп'ютерну модель індукційного припаювання твердосплавних вставок до корпусу різців для дорожно-фрезерних машин, за допомогою якої вибрано оптималь-

Для контролю за рівнем температури припою (поверхня контакту вставки з корпусом) та рівнем і перепадом температури на поверхні корпусу були побудовані графіки зміни температури в точках 1 і 2 та 3, 4, 5 і 6 протягом часу нагріву (рис. 4, криві 1–6). Із рисунка видно, що через близькість до витків індуктора максимальна температура в різці протягом всього часу нагріву досягається в точці 3 поверхні корпусу різця. Після досягнення в момент часу  $25$  с в корпусі різця рівня температури, близької до  $800$  °C швидкість нагріву різко зменшується (в декілька разів), однак нагрів системи «вставка–корпус різця» продовжується. При цьому зменшується також, хоча і незначно, перепад температури між вказаними контрольними точками. Дане явище зумовлено в значній

ну конфігурацію індуктора та режими нагріву, що дає змогу забезпечити високу зносостійкість та міцність різців після їх подальшого загартування.

Виявлено вплив температури Кюрі та температурної залежності коефіцієнту теплопровідності матеріалу корпусу різця на характер температурного поля в різці при його індукційному нагріві.

### **Література**

1. Вировец Л. Н., Лукаш В. А., Майстренко А. Л. и др. Отечественные резцы для дорожно-фрезерных машин // Инструментальный світ. – 2005. – № 2 (26). – С. 25–27.
2. Дутка В. А. Математическое моделирование электромагнитных и термомеханических полей при горячем прессовании керамических материалов с использованием индукционного нагрева. – Докл. АН УССР. Сер. А. – 1991. – № 2. – С. 15–19.
3. Варгафтик Н. Б. Теплофизические свойства веществ: Справ. – М.-Л.: Техноэнергоиздат, 1956. – 367 с.
4. Марочник сталей и сплавов / Под ред. В. Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
5. Туманов В. И. Свойства сплавов системы карбид вольфрама–кобальт. – М.: Металлургия, 1971. – 95 с.
6. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справ. / Под общ. ред. В. А. Григорьева и В. И. Зори-на. – М.: Энергоиздат, 1982. – 510 с.

*Надійшла 21.07.06*