

## ТЕПЛОВІ ЯВИЩА ПІД ЧАС ЕЛЕКТРОФРИКЦІЙНОГО РОЗРІЗАННЯ ЗАГОТОВОК

© Покінтелиця М.І., Левченко О.О., 2013

Наведено спосіб електрофрикційного розрізання заготовок дисковими пилами тертя. Розглянуто особливості теплових явищ під час оброблення та розроблено математичну модель з розрахунку контактної температури в зоні різання, в якій враховуються складні теплофізичні умови і режими оброблення, що дасть змогу управляти процесами теплоутворення та якістю обробленої поверхні.

**Ключові слова:** електрофрикційне розрізання, оброблення, температура, теплота, дискова пила тертя, заготовка.

**Are ways electrical frictional cutting billets by friction circular saws. The features of thermal phenomena in the processing and developed a mathematical model for calculating the contact temperature in the cutting zone, which takes into account complex thermo-physical conditions and modes of processing, thereby allowing control of processes of heat generation and the quality of the machined surface.**

**Key words:** electrical frictional cutting, processing, temperature, heat, friction circular saw, blank.

**Постановка проблеми.** Аналіз методів оброблення металів різанням з попереднім підігрівом показує, що застосування висококонцентрованого локального нагрівання зрізаного шару є найперспективнішим у сучасному виробництві під час обробки заготовок з різних матеріалів, зокрема важкооброблюваних. Це зумовлено тим, що цей метод дає змогу підвищити продуктивність праці у 2–4 рази, скоротити витрати на різальний інструмент у 1,5–2,5 рази, зменшити собівартість оброблення і розширити область раціонального використання нових важкооброблюваних конструкційних матеріалів. Важливе місце у комплексі операцій механічного оброблення належить розрізанню заготовок. Одним з перспективних методів оброблення металів з локалізованим нагріванням зрізаного шару є електрофрикційне розрізання (ЕФР) заготовок дисковими пилами тертя [1].

Важливе місце серед процесів, властивих механічному обробленню металів, належить тепловим явищам. Теплові процеси виникають у кожному елементі технологічної системи і роблять безпосередній вплив, як на показники якості обробленої поверхні, так і на особливості контактних процесів у зоні різання.

Як відомо, параметри якості поверхневого шару (глибина і ступінь наклепу, величина і знак залишкових напружень) значною мірою залежать від теплового чинника. Якщо режими різання та інші умови оброблення зміняться так, що кількість теплоти, що генерується в зоні різання, зросте, то потрібно очікувати зменшення ступеня і глибини наклепаного шару. Тому визначення температури в зоні різання за ЕФР становить науковий інтерес.

**Аналіз основних досліджень та публікацій.** Тема та напрямок дослідження розглядаються у багатьох літературних джерелах. Суцільне нагрівання заготовки з подальшим встановленням її на верстаті для виконання процесу різання досліджений у [3–6, 10, 12]. У промисловості часто використовують нагрівання на попередніх операціях, наприклад, під час термооброблення або

оброблення металів тиском. У багатьох роботах представлені результати досліджень способу оброблення заготовок з використанням теплової дії сил високошвидкісного тертя у зоні контакту інструмента, який виконаний у вигляді сталевого диска різного діаметра та товщини, і заготовки [1, 2, 7]. Вважається, що переважна частина теплоти тертя поглинається диском, але останній розігрівається мало, оскільки теплота не проникає углиб нього і швидко відводиться внаслідок охолодження [3]. Було встановлено, що температура в зоні різання залежить від колової швидкості диска. За високих швидкостей (близько 100 м/с) метал доводиться до температури плавлення, а за низьких (13...15 м/с) – тільки до розм'якшення [2, 5]. Були опубліковані результати досліджень, які показали, що за фрикційного розрізання температурне поле на високих швидкостях подачі дуже стиснене і стабілізація його відбувається майже миттєво. Отже, процес розрізання здійснюється в умовах квазістаціонарного температурного поля. В останній час область застосування тертя за високих швидкостей ковзання для технологічних операцій значно розширилася. У [8, 9] стверджується, що зі збільшенням колової швидкості диска температура різання на поверхні контакту зростає, асимптотично наближаючись до точки плавлення оброблюваного матеріалу. Інші автори не поділяють цієї точки зору, вважаючи, що з підвищенням швидкості обертання диска температура різання спочатку підвищується, досягаючи максимуму, а потім спадає [10]. Усе це свідчить про те, що це питання вимагає подальшого вивчення.

**Формулювання цілі статті.** Метою дослідження є визначення особливостей теплових явищ процесу ЕФР металів і розроблення математичної моделі з визначенням температури в зоні різання, в якій враховуються складні теплофізичні умови і режими оброблення металів дисковими пилами тертя, що уможливить управляти процесами теплоутворення та якістю оброблюваної поверхні.

**Виклад основного матеріалу.** Для раціонального використання теплоти необхідно забезпечити її управління у процесі різання, оскільки її можна використати тільки на різке місцеве підвищення температури деформованого металу або поверхні різального інструмента. До завдань управління теплою в процесі різання належить не тільки регулювання загальної кількості одержуваної теплоти, яка пропорційна до затрачуваної механічної роботи, але також рівномірний, за можливості, розподіл джерел теплоти по усьому об'єму деформованого під час різання металу. Необхідно створити умови, за яких об'єм пластично деформованого металу ставав би меншим на одиницю довжини різального леза. Тому, враховуючи ці міркування, особливий інтерес являє собою не тільки кількість теплоти, що перейшла у стружку, інструмент або оброблювану заготовку, а й характер температурних полів та їх напруженість у зоні відділення стружки і утворення нової (обробленої) поверхні.

Сутність процесу різання металів дисковими пилами тертя полягає у тому, що високошвидкісний, тонкий сталевий диск розплавляє або розм'якшує матеріал заготовки завдяки теплоті, що виділяється при терті, і викидає його з прорізу з великою швидкістю у вигляді снопа розпечених іскор. При цьому найдрібніші частки металу, з'єднуючись з киснем повітря, згоряють на льоту, перетворюючись на окалину, а більші, спікаючись, застигають у формі сплесків, крапельок і кульок, утворюючи доволі щільну і міцну масу сталагітоподібної форми [1]. Ефект термофрикційного різання посилює підведення електричного струму у зону різання [2]. Електричний струм нагріває зрізаний шар, що значно зменшує частку теплоти. У процесі оброблення перед диском є шар металу, нагрітий до високих температур і знаходиться у пластичному стані, який видавлюється під дією нормальних навантажень. Тому видалення металу здійснюється ще й пластичним різанням. Усе це зменшує навантаження на підшипники шпинделя і діаметр диска та поліпшує технологічні умови використання цього способу оброблення.

Джерелами теплоти за ЕФР є поверхні тертя оброблюваного металу і робочих поверхонь дискової пили. Отриману теплоту необхідно направляти так, щоб вона спільно з теплою,

отриманою в результаті внутрішнього тертя, рівномірно розподілялася у металі, який деформується. Це б унеможливило різкі коливання температурного поля, що утворилося.

Особливість способу ЕФР розрізання полягає у тому, що до місця контакту пили тертя з двома оброблюваними заготовками підводиться електричний струм великої сили (до 1000 А) і низької напруги (1...2 В), внаслідок чого зона стружкоутворення піддається додатковому сильному нагріванню і під дією зусилля притиску пили тертя, що швидко обертається, деформується і руйнується. При цьому досягається висока продуктивність розрізання важкооброблюваних матеріалів і економія дефіцитних інструментальних матеріалів, адже пили тертя виготовляються з конструкційної сталі та мають просту геометрію [1].

Як показали досліди і попередні теоретичні розрахунки, управління теплотою під час термофрикційного різання можна здійснити за допомогою регулювання швидкостей обертання та подачею диска і геометричних параметрів інструменту.

Досліджуючи закономірності процесу ЕФР і виконуючи практичні завдання, пов'язані з вибором технологічного режиму, необхідно враховувати закономірності процесів тертя за високих швидкостей ковзання. У процесі поєднуються такі явища, як тепловиділення під час тертя; високі швидкості ковзання контактуючих тіл; безперервне оновлення контактуючих поверхонь; виникнення і негайне руйнування зв'язків між контактуючими поверхнями за їх відносного руху; майже миттєве нагрівання і швидке охолодження малих об'ємів металу в умовах значних тисків; пружно-пластичні деформації в макрооб'ємі шарів металу, що прилягають до цих поверхонь; пластичне деформування розігрітого металу під дією нормальних зусиль з відділенням стружки.

У процесі тертя енергія, витрачена на подолання сил тертя (молекулярно-механічної взаємодії поверхонь), виділяється у формі теплоти, і насамперед на елементарних площинках фізичного контакту. У цих точках під час тертя можуть з'явитися короткочасні температурні спалахи, які швидко підвищують температуру мікрорівнів. Їх температура може також швидко спадати завдяки інтенсивному відведенню теплоти углиб диска, заготовки і в навколишнє середовище, але середня температура поверхні контакту в початковий період процесу тертя зростатиме.

Тепловиділення під час тертя відбувається не тільки на поверхнях точок фізичного контакту. Деформування мікрорівнів, на яке витрачається деяка частина енергії під час тертя, також є причиною теплогенерування. Розподіл теплоти між стружкою, інструментом і заготовкою залежить від частоти обертання і швидкості подачі дискової пили тертя. Із збільшенням колової швидкості пили значна кількість теплоти переходить у заготовки, а температура в зоні різання збільшує тепловий ефект деформації. За високих температур підігрівання можуть виникати небажані явища, пов'язані зі зміною властивостей матеріалів, такі як: окислення, вигорання елементів хімічного складу, розпушення поверхневих шарів, структурні зміни і тріщини. Здебільшого такі зміни є неприпустимими у зв'язку з технічними вимогами, встановленими не тільки на метал, а й на відходи процесу різання – металеву стружку. Отже, для використання позитивного ефекту різкого підвищення продуктивності різання за високотемпературного підігрівання матеріалів із змінними властивостями необхідно так локалізувати подачу додаткової кількості теплоти в оброблюваний метал, щоб необхідне зменшення міцності матеріалу під дією високих температур було зосереджене у тонкому шарі зони зсуву.

ЕФР заготовок пилами тертя супроводжується великим виділенням теплоти, яка має істотний вплив як на продуктивність процесу, так і на якість обробленої поверхні. Особливо важливе значення це має під час розрізання заготовок з важкооброблюваних матеріалів, для яких цей спосіб оброблення здебільшого є єдиною можливістю.

Як показали дослідження, температура різання за ЕФР може сягати 1200...1400 °С. Висока температура розігріває метал в зоні різання і може змінювати значною мірою умови і режими оброблення. Особливо важливим є те, що з досягненням визначеної для кожної марки сталі температури її межі міцності і пружності починають різко знижуватися, що дає змогу підвищити продуктивність розрізання за рахунок збільшення швидкості подачі.

Принципова кінематична схема ЕФР складається з двох поєднаних рухів: головного обертового дискової пили тертя  $Dr$ , який знімає припуск на обробку та забезпечує нагрівання зони різання, і руху подачі пили  $Ds$  (рис. 1). Пила тертя діаметром  $D$  і завтовшки  $b$  обертається зі швидкістю  $V_D$  у напрямку головного руху  $Dr$ . Здійснюючи обертовий рух, пила тертя отримує подачу на заготовки діаметром  $d$  зі швидкістю  $V_{II}$  (рух подачі  $Ds$ ). За переміщення інструмента відбувається процес пластичного деформування розігрітого електрострумом і силами тертя зрізаного шару з утворенням стружки, яка містить в собі частинки різної форми типу стружки надлому, частинки кулястої форми, які утворилися під час охолодження розплавленого металу, частинки фрезерної зливної стружки або стружки сколювання і частинки наросту. Для здійснення процесу ЕФР розроблено конструкцію дискової пили тертя і затискних фланців для кріплення на шпинделі верстата. З метою забезпечення замикання електричного ланцюга по контуру перша заготовка–пила тертя–друга заготовка, і для виконання вимог правил безпечної роботи на металорізальних верстатах пила тертя ізольована від затискних фланців і елементів кріплення спеціальними діелектричними прокладками і втулками [1, 2].

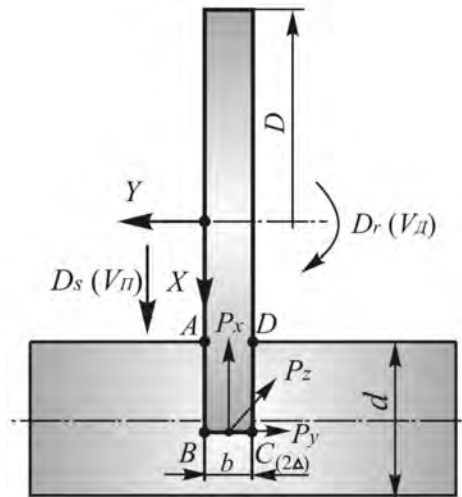


Рис. 1. Схема зони контакту дискової пили тертя і заготовки за ЕФР

Концентроване нагрівання контактних поверхонь пили тертя і заготовки є основним техніко-економічним чинником способу ЕФР.

Загальна теплова потужність  $Q_0$  процесу ЕФР визначається так [1]:

$$Q_0 = Q + Q_E,$$

де  $Q$  – потужність перетворення у теплоту механічної роботи;  $Q_E$  – потужність підігрівання зони оброблення електричним струмом.

Між механічною потужністю процесу і її тепловим еквівалентом теоретично немає повної кількісної ідентичності, оскільки частина механічної енергії переходить у поглинену енергію деформації кристалічної решітки оброблюваного матеріалу. Проте дослідження показують, що за великих ступенів деформації поглинена енергія незначна, і з достатньою для практики точністю можна вважати, що уся робота переходить у теплоту, тобто

$$Q = P_X V_D \mu,$$

де  $\mu$  – коефіцієнт тертя за ЕФР ( $\mu = P_z / P_x$ );  $P_z$ ,  $P_x$  – відповідно тангенціальна та радіальна складові сили різання.

Залежно від умов роботи пили тертя величина  $\mu = 0,28 \dots 0,36$ .

Отже, тепловий баланс ЕФР може бути представлений так:

$$Q_0 = Q + Q_E = P_X V_D \mu + I^2 R t,$$

де  $V_D$  – швидкість обертання диска, м/с;  $I$  – сила електричного струму у вторинному колі, А;  $R$  – опір вторинного кола, Ом;  $t$  – час дії джерела теплоти, с; ( $t = t_p / V_{II}$ );  $t_p$  – середня довжина умовної площини зсуву, м.

З цього рівняння зрозуміло, що регулювання процесу нагрівання за ЕФР залежить від параметрів режиму різання, квадрата сили електричного струму, опору та часу протікання струму.

Варто зазначити, що безпосереднє застосування закону Джоуля-Ленца для визначення кількості теплоти, необхідної для здійснення розрізання, не дає розв'язку через особливості, властиві процесу контактного нагрівання. Так, опір  $R$  не є постійним по довжині провідника.

Повний опір  $R = R_z + R_k$ , де  $R_z$  – омичний опір заготовки;  $R_k$  – перехідний опір у місцях контакту заготовок з пилою тертя. Виникнення значного перехідного опору у місцях контакту пояснюється тим, що дотик заготовок з пилою тертя відбувається не по усій площі, а тільки в її окремих точках.

Нагрівання за ЕФР відбувається нерівномірно. Найбільша кількість теплоти виділяється у місці контакту і поширюється шляхом теплопровідності у масу пили тертя і заготовок. При цьому теплота виділяється у зоні деформації і переходить до сусідніх областей металу. Процес наближається до ізотермічного; в металі знижується межа міцності і посилюється адіабатичне нагрівання. Наявність мідних затискачів електродів сприяє збільшенню тепловідведення. Крім того, спостерігаються втрати теплоти через конвекцію і випромінювання. Загальна картина явищ, що відбуваються під час нагрівання струмом, ускладнюється ще й тим, що величини температурних коефіцієнтів і коефіцієнтів теплопровідності, конвекції і випромінювання змінюються залежно від температури.

Режим нагрівання за ЕФР визначається потужністю струму і часом його протікання через пилу тертя і заготовки. Зазвичай прагнуть отримати інтенсивне нагрівання в можливо невеликий проміжок часу. Такий режим забезпечує підвищення продуктивності та ККД обладнання, економію електроенергії, зменшення окислення заготовок і величини зони термічного впливу та можливість різання металів з високою теплопровідністю і спеціальних легованих сталей.

За результатами досліджень встановлено, що за загальної температури ЕФР 1200 °С складова частина нагрівання від електричного струму у середньому становить 50 %. В такий спосіб, якщо для отримання температури різання 1100...1250 °С під час термофрикційного розрізання потрібна швидкість різання 45...50 м/с, то за ЕФР її можна знизити до 15...20 м/с.

Тертя металевого диска і заготовки на великій швидкості виконує основну теплотвірну функцію в зоні контакту за ЕФР. За зміни режимів різання змінюються умови тертя між інструментом, стружкою і заготовкою внаслідок зміни швидкості ковзання і температури поверхонь, що труться, що призводить до зміни механічних властивостей металу зрізаного шару. Ступінь нагрівання залежить від фізико-механічних властивостей металів. Чим більша твердість і чим менша температуропровідність, тим нижчі абсолютні значення швидкостей початку адіабатичного процесу. Тому ЕФР жароміцних металів, які мають низьку температуропровідність і високу твердість, відбувається у найвигідніших умовах.

Електроконтактне підігрівання, і так само тертя інструмента і заготовок на великій швидкості призводить до утворення високої температури  $\Theta$  в зоні різання. Максимальна температура концентрується спереду інструмента. Зрізаний шар нагрівається раніше від початку процесу різання. Змінюючи силу і напругу електричного струму і частоту обертання пили та швидкість її подачі, можна регулювати інтенсивність нагрівання зони різання. При цьому теплота виділяється у зоні деформації і переходить до сусідніх областей металу. Процес наближається до ізотермічного; в металі знижується межа міцності і посилюється адіабатичне нагрівання.

Відомо, що процес теплопередачі в нерухомому твердому середовищі здійснюється за рахунок теплопровідності і описується рівнянням [12]:

$$\frac{d\Theta}{dt} = \frac{\lambda}{C\gamma} \left( \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} \right). \quad (1)$$

Однак під час проведення технологічної операції ЕФР доводиться мати справу з рухомим джерелом теплоти. У цьому випадку перенесення теплоти здійснюватиметься не тільки за рахунок теплопровідності, але й за рахунок відносного руху нагрітої заготовки.

За наявності руху теплового джерела необхідно систему координат пов'язати з рухомим джерелом. За суміщення осі  $X$  з напрямком руху теплового джерела диференціальне рівняння теплопровідності (1) запишеться у такому вигляді [12]:

$$\frac{d\Theta}{dt} = \frac{\lambda}{C\gamma} \left( \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} \right) + V_{II} \frac{\partial \Theta}{\partial x},$$

де  $V_{II}$  – швидкість переміщення теплового джерела, м/с;  $C$  – питома теплоємність, Дж/кг·К;  $\gamma$  – щільність, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К).

Для розв'язання теплофізичних задач у процесі ЕФР металів застосовано метод джерел (метод Гріна), суть якого полягає у тому, що якщо відомий закон зміни температури у точці теплопровідного простору від джерела теплоти, поміщеного в іншу точку, що виділив кількість теплоти  $Q$  в поточний момент часу  $t$ , то температура у заданій точці з координатами  $(x, y, z)$  від системи розподілених в просторі джерел визначається суперпозицією з температурних полів. Розв'язок задачі зводиться до визначення функції  $\Theta(x, y, z)$  від джерела теплоти  $Q$  (функція Гріна). Розподіл теплових джерел у просторі, часі їх дії і руху враховуються інтегруванням.

За ЕФР джерело теплоти наведене у формі неповного прямокутника ABCD і рухається у напрямку до осі OX зі швидкістю  $V_{II}$ .

Температурне поле є суперпозицією трьох полів, що створюються відрізками AB, CD і BC. Нехай  $\Theta_1(x, y)$  – поле від відрізка AB, тоді

$$d\Theta_1 = \frac{q dx' dt'}{C\gamma 4\pi a_1 (t-t')} \cdot \exp \left\{ -\frac{[(x-x') + V_{II}(t-t')]^2 + y^2}{4a_1(t-t')} \right\},$$

де  $q = (P_Z \cdot V_{II})/F$  – щільність теплового потоку, що надходить у заготовку ( $F$  – площа контакту диска з поверхнею заготовки);  $a_1$  – коефіцієнт температуропровідності;  $x, x'; y, y'; t, t'$  – відповідно поточні та початкові значення координат  $x$  та  $y$  і часу  $t$ .

$\Theta_2(x, y)$  – поле від відрізка CD.

$$d\Theta_2 = \frac{q dx' dt'}{C\gamma 4\pi a_1 (t-t')} \cdot \exp \left\{ -\frac{[(x-x') + V_{II}(t-t')]^2 + (y+2\Delta)^2}{4a_1(t-t')} \right\}.$$

$\Theta_3(x, y)$  – поле від відрізка BC:

$$d\Theta_3 = \frac{q dy' dt'}{C\gamma 4\pi a_1 (t-t')} \cdot \exp \left\{ -\frac{[x + V_{II}(t-t')]^2 + (y-y')^2}{4a_1(t-t')} \right\}.$$

$$\Theta_1(x, y) + \Theta_2(x, y) = \int_0^a \int_0^t d(\Theta_1 + \Theta_2).$$

$$\Theta_3(x, y) = \int_{-2\Delta}^0 \int_0^t d\Theta_3.$$

Проведемо розрахунок інтеграла:

$$\begin{aligned} & \int_0^t \frac{q}{C\gamma 4\pi a_1 (t-t')} \exp \left\{ -\frac{[(x-x') + V_{II}(t-t')]^2 + y^2}{4a_1(t-t')} \right\} dt' = \\ & = \frac{q}{C\gamma 4\pi a_1 (t-t')} \cdot \exp \left\{ -\frac{(x-x')V_{II}}{2a_1} \right\} \times \\ & \times \int_0^t \exp \left\{ -\frac{(x-x')^2 + V_{II}^2(t-t')^2 + y^2}{4a_1(t-t')} \right\} dt' = \frac{q[y^2 + (x-x')^2]}{8C\gamma\pi a_1} \cdot \exp \left\{ -\frac{(x-x')V_{II}}{2a_1} \right\} \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times \int_{\sqrt{\frac{y^2+(x-x')^2}{4a_1t}}}^{\infty} \frac{\exp\left\{-u^2 - \frac{V_{II}^2}{16a_1^2} \cdot \frac{y^2+(x-x')^2}{u^2}\right\}}{u \frac{y^2+(x-x')^2}{4a_1}} du = \frac{q}{2C\gamma\pi a_1} \cdot \exp\left\{-\frac{(x-x')V_{II}}{2a_1}\right\} \times \\ & \times \int_{\sqrt{\frac{y^2+(x-x')^2}{4a_1t}}}^{\infty} \frac{\exp\left\{-u^2 - \frac{V^2}{16a_1^2} \cdot \frac{y^2+(x-x')^2}{u^2}\right\}}{u} du. \end{aligned}$$

Знайдемо стаціонарне розподілення  $t \rightarrow +\infty$ . Матимемо:

$$\int_0^{\infty} \frac{\exp\left\{-u^2 + \frac{V_{II}^2}{16a_1^2} \cdot \frac{[y^2+(x-x')^2]}{u^2}\right\}}{u} du = K_0\left[\frac{V_{II}}{2a_1} \sqrt{y^2+(x-x')^2}\right],$$

де  $K_0(z) = \int_0^{\infty} \exp\left(-u^2 - \frac{z^2}{4u^2}\right) \frac{du}{u}$ .

Далі

$$\begin{aligned} \Theta_1(x, y) + \Theta_2(x, y) &= \frac{q}{2C\gamma\pi a_1} \int_0^a \exp\left[-\frac{(x-x')V_{II}}{2a_1}\right] \cdot \left[ K_0\left(\frac{V_{II}}{2a_1} \sqrt{y^2+(x-x')^2}\right) + \right. \\ & \left. + K_0\left(\frac{V_{II}}{2a_1} \sqrt{(y+2\Delta)^2+(x-x')^2}\right) \right] dx'; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \int_0^t \frac{q}{4C\gamma\pi a_1(t-t')} \cdot \exp\left\{-\frac{[(x+V_{II}(t-t'))^2+(y-y')^2]}{4a_1(t-t')}\right\} dt' = \frac{q}{4C\gamma\pi a_1} \cdot \exp\left\{-\frac{xV_{II}}{2a_1}\right\} \times \\ & \times \int_0^t \exp\left\{-\frac{x^2+V_{II}^2(t-t')^2+(y-y')^2}{4a_1(t-t')}\right\} dt' = \frac{q}{8C\gamma\pi a_1} \cdot \exp\left\{-x \frac{V_{II}}{2a_1}\right\} \times \\ & \times \int_{\sqrt{\frac{(y-y')^2+x^2}{4a_1t}}}^{\infty} \frac{\exp\left\{-u^2 - \frac{V_{II}^2}{16a_1^2} \cdot \frac{(y-y')^2+x^2}{u^2}\right\}}{u} du. \end{aligned}$$

За  $t \rightarrow +\infty \Rightarrow$

$$\begin{aligned} & \int_0^t \frac{q}{4C\gamma\pi a_1(t-t')} \cdot \exp\left\{-\frac{[(x-V_{II}(t-t'))^2+(y-y')^2]}{4a_1(t-t')}\right\} dt' = \\ & = \frac{q}{8C\gamma\pi a_1} \cdot \exp\left\{-x \frac{V_{II}}{2a_1}\right\} \cdot K_0\left[\frac{V_{II}}{2a_1} \sqrt{x^2+(y-y')^2}\right]. \end{aligned}$$

Остаточно матимемо

$$\Theta_3(x, y) = \frac{qe^{-\frac{xV_{II}}{2a_1}}}{8C\gamma\pi a_1} \int_{-2\Delta}^0 K_0 \left[ \frac{V_{II}}{2a_1} \sqrt{x^2 + (y - y')^2} \right] dy'$$

З використанням отриманих залежностей проведено розрахунок температурного поля у зрізаному шарі та заготовці. Результати розрахунку наведені у таблиці: верхній рядок – заготовки зі сталі 45; нижній – зі сталі 12X13.

### Температурне поле у заготовці за ЕФР

Координата X, мм	Координата Y, мм									
	1,0	0	-1,0	-2,0	-3,0	-4,0	-5,0	-6,0	-7,0	-8,0
0,5	560	600							600	560
	530	570							570	530
1,0	605	880							880	605
	655	940							940	655
1,5	700	1220	1200	1190	1180	1180	1190	1200	1220	700
	725	1250	1230	1220	1200	1200	1220	1230	1250	725
2,0	590	810	895	980	1020	1020	980	895	810	590
	565	780	865	950	990	990	950	865	780	565
2,5	460	590	650	720	790	790	720	650	590	460
	430	560	620	690	760	760	690	620	560	430
3,0	420	510	540	560	610	610	560	540	510	420
	390	480	510	530	580	580	530	510	480	390

За даними розрахунків побудоване температурне поле для заготовок зі сталі 45 (рис. 2).

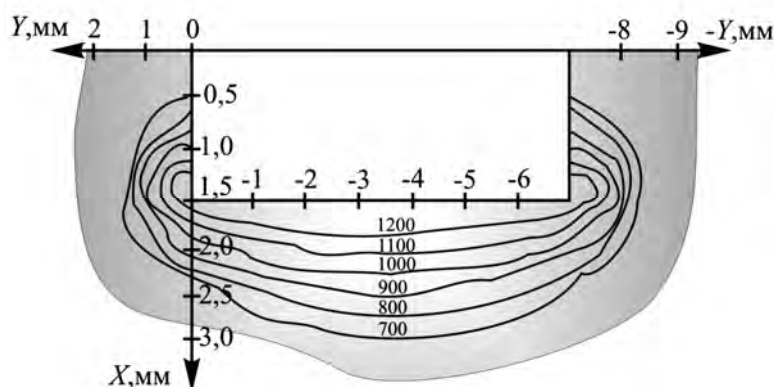


Рис. 2. Температурне поле у заготовці за ЕФР:  
заготовка – сталь 45;  $V = 15$  м/с;  $V_3 = 6,7 \cdot 10^{-4}$  м/с

**Висновки.** Вивчення температурних полів під час обробки сталей 45 і 12X13 показує, що внаслідок низької теплопровідності легованих сталей у зоні різання і у стружці спостерігається локалізація теплоти, що призводить до збільшення ступеня розм'якшення і зменшення міцності металу зрізаного шару.



Зниження швидкості різання за рахунок додаткового розігрівання зрізуваного шару електричним струмом створює сприятливі умови для проведення технологічного процесу розрізання заготовок, підвищує працездатність вузлів і деталей металорізального обладнання та інструменту, знижує шум у роботі і підвищує ефективність процесу розрізання заготовок.

1. Зарубицький Є.У. Розробка й дослідження процесу ефективності термофрикційного оброблення матеріалів / Є.У. Зарубицький. – К., 1993. – 76 с. 2. Зарубицький Е.У. Тепловые нагрузки и разгрузки элементов режущего клина при термофрикционном резании / Е.У. Зарубицький, Т.П. Костина, В.А. Плахотник // Конструирование и производство транспортных машин. – Харьков: Изд-во ХГУ, 1987. – С. 95–99. 3. Борисов Б.Я. Высокоскоростное резание металлов пилами / Б.Я. Борисов. – К.: Вышш. шк., 1970. – 91 с. 4. Балакин В.А. Трение и износ при высоких скоростях скольжения / В.А. Балакин. – М.: Машиностроение, 1980. – 136 с. 5. Вольф В.Ф. Пилы для резания горячего металла / В.Ф. Вольф. – Свердловск: Изд-во УПИ, 1970. – 118 с. 6. Серегин С.А., Люленков В.И. Температура контактной поверхности при трении металлов / С.А. Серегин, В.И. Люленков // Тепловая динамика трения. – М.: Наука, 1970. – С. 122–126. 7. Сизый Ю.А. Теория и практика фрикционной разрезки / Ю.А. Сизый. – Харьков: ХПИ, 1995. – 333 с. – Деп. в ГНТБ Украины 15.04.95, №2501–УК95. 8. Гаркунов Д.Н. Виды трения и износа. Эксплуатационные повреждения деталей машин / Д.Н. Гаркунов, П.И. Корник. – М.: Изд-во МСХА, 2003. – 344 с. 9. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия / И.Г. Горячева. – М.: Наука, 2001. – 478 с. 10. Васин С.А. Резание материалов: термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании / С.А. Васин, А.С. Верещака, В.С. Кушнер. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 448 с. 11. Сорокин Г.М. Трибология сталей и сплавов / Г.М. Сорокин. – М.: Недра, 2000. – 317 с. 12. Якимов А.В. Основы теории тепловых явлений при шлифовании деталей машин / А.В. Якимов, Б.О. Ткаченко, С.Г. Зимин, А.А. Якимов. – Одесса: ОГПУ, 1997. – 272 с.