# Инструмент, порошки, пасты

УДК 004.942:621.785:621.9.025.7

**В. А. Дутка** (м. Київ)

## Порівняльний аналіз результатів загартування державки твердосплавного різця в різних рідинних середовищах після індукційного паяння

*Приведено результати прогнозування твердості та товщини загартованого приповерхневого шару стальної (сталь 35ХГСА) державки твердосплавного різця при загартуванні у водному розчині солей і основ, воді та мастилах при різних температурах гартівної рідини. Показано кількісну та якісну відмінність термокінетичних траєкторій охолодження точок поверхні державки в перших двох гартівних сумішах та мастилах кімнатної температури. В результаті чисельного дослідження процесу гартування у воді з температурою 100 °С виявлено ефект різкого зростання швидкості охолодження поверхні державки — в 2—3 рази — в момент входження траєкторії охолодження в область фазових перетворень аустеніту в бейніт. Для випадку загартування у водному розчині солей і основ отримано функціональну залежність товщини загартованого на максимальну твердість приповерхневого шару державки від температури гартівної рідини.*

***Ключові слова:*** *комп'ютерне моделювання, індукційне паяння, гартування, твердість, товщина загартованого шару.*

**Вступ.** Для успішного здійснення процесу гартування державки твердосплавного різця після індукційного паяння важливо мати інформацію про результати загартування в різних середовищах. В [1, 2] приведено результати лабораторних досліджень процесу гартування стальних деталей на різних режимах у різних гартівних рідинах. Така інформація є важливою для вибору гартівних середовищ та режимів гартування, оскільки її достовірність підтверджена результатами багаточисельних експериментів. Однак вона є не зовсім повною, оскільки на її основі неможливо дати вичерпну відповідь на ряд питань: чому, наприклад, в результаті загартування в одних середовищах можна отримати необхідні властивості (твердість, в'язкість і т. п.) загартованої деталі, а в інших ні; яким чином вибирати гартівне середовище та режими гартування і т. п. Більш інформативними з цієї точки зору можуть бути результати комп'ютерного моделювання проце-

© В. А. ДУТКА, 2009

су гартування, оскільки вони дають змогу простежити поведінку температурно-часових траєкторій точок важливих зон об'єму деталі в процесі гартування та виявити особливості поведінки цих траєкторій на його окремих стадіях.

**Описання чисельних експериментів.** Дана робота присвячена чисельному дослідженню процесу загартовування робочої поверхні стальної (сталь 35ХГСА) державки твердосплавного різця в кожному з трьох рідинних середовищ: у водному розчині солей і основ, у мастилі, у воді. Технологічно процес гартування здійснюється таким самим чином, як описано в [3, 4]: на стадії індукційного паяння твердосплавної вставки різця до його державки відбувається нагрівання поверхні державки до температур, вищих на 30—50 °С від температури $A_{c3}$ — температури β-γ перетворення в даній сталі, яка є доевтектоїдною; після індукційного паяння протягом певного проміжку часу $\Delta t$ йде витримка, після чого починається процес гартування. Величина $\Delta t$ вибирається якомога меншою, але такою, щоб за цей час припій, котрим припаюється твердосплавна вставка до державки, встиг затверднути. Для чисельного дослідження температурного стану різця і прогнозування твердості та товщини загартованого приповерхневого шару державки використано чисельну методику [5].

У комп'ютерних дослідженнях розрахункові схеми (рис. 1), які використовують в моделюванні процесів індукційного паяння різця, охолодження його на повітрі при перенесенні від індуктора в гартівну рідину та під час гартування, вибрані такими, як в [5]. Такими ж вибрано режими індукційного нагрівання (тривалість нагрівання дорівнювала 50 с, електричний струм в індукторі — 500 А, його частота — 66000 Гц) і охолодження на повітрі (тривалість $\Delta t$ витримки на повітрі — 15 с, коефіцієнт конвективного теплообміну на поверхні різця під час його охолодження на повітрі — 30 Вт/м$^2$·град). Чисельні експерименти виконано для трьох випадків загартування відповідно в таких трьох рідинах: у водному розчині солей і основ різної температури, в мастилах при кімнатній температурі та у воді різної температури. Відповідно для цих випадків при моделюванні процесу гартування було використано величини коефіцієнтів конвективного теплообміну, графіки $\alpha = \alpha(T)$ температурної залежності яких представлено на рис. 2. При дослідженні процесу гартування у водному розчині солей і основ вибрано температурну залежність середнього значення коефіцієнта теплообміну $\alpha(T)$ (див. рис. 2, *а*) для наведеної в [1] двовимірної області у площині $T$—$\alpha(T)$. При дослідженні процесу гартування в мастилах та воді вибрано величини $\alpha(T)$ (див. рис. 2, *б*, *в*) за графіками, також наведеними в [1]. Слід зазначити, що в [5] представлено результати чисельних досліджень процесу гартування державки різця в гартівній рідині з температурою 300 °С для трьох випадків температурної залежності коефіцієнта конвективного теплообміну $\alpha(T)$ у водному розчині солей і основ: для температурної залежності максимального значення цього коефіцієнта, а також середнього та мінімального значень. В даній роботі при дослідженні процесу гартування у водному розчині солей і основ обмежились випадком температурної залежності лише середнього значення коефіцієнта теплообміну, але для трьох значень температури гартівної рідини: 100, 200 і 300 °С. Відомо, що величина коефіцієнта теплообміну $\alpha = \alpha(T)$ залежить також і від температури гартівної рідини, однак в [1] для випадку охолодження металічного зразка у водних розчинах солей і основ наведено лише область зміни α, а не окремі криві $\alpha = \alpha(T)$. Тому використання однакового вигляду кривої $\alpha = \alpha(T)$ середнього значення коефіцієнта теплообміну для дослідження процесу гартування в гартівних рідинах різних температур вносить певну

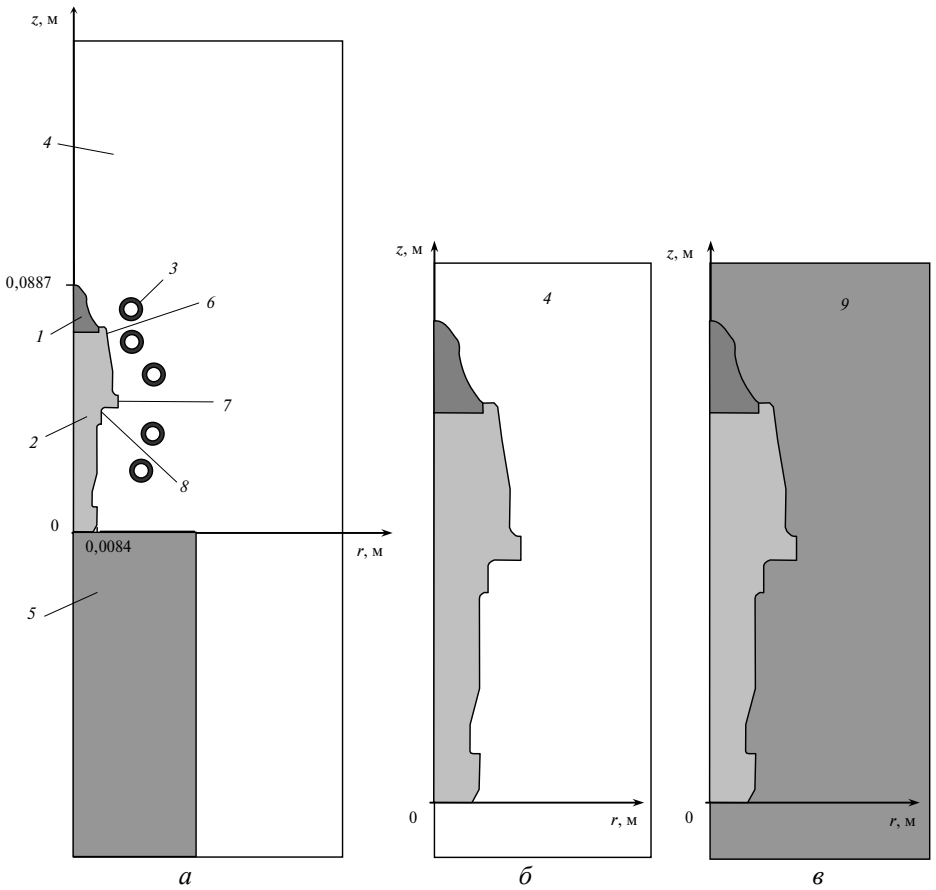


Рис. 1. Розрахункові схеми (половина осьового перерізу просторової області) процесів: індукційного паяння різця (*а*), охолодження на повітрі (*б*) та загартування (*в*): *1* — твердосплавна вставка різця (сплав ВК8); *2* — стальна державка різця; *3* — витки індуктора (мідь); *4* — навколишній повітряний простір; *5* — підставка (вогнетривка цегла); *6* — зона поверхні державки поблизу вставки; *7* — буртик державки; *8* — зона біля буртика; *9* — гартівна рідина.

похибку в отримані результати обчислень. Однак в першому наближенні для порівняльного аналізу достатньо і цього одного випадку використання вибраного середнього значення коефіцієнта теплообміну для того, щоб охарактеризувати процес гартування у водному розчині солей і основ.

Для визначення твердості в точках об'єму загартованої державки та товщини загартованого приповерхневого шару використовували таку ж саму термокінетичну діаграму (ТКД) перетворення переохолодженого аустеніту (рис. 3), як і в [5], а саме ТКД для сталі 35ХМ — замінника сталі 35ХГСА, оскільки в доступних літературних джерелах не вдалося знайти ТКД для цієї сталі. При цьому для обчислення величини твердості в точках об'єму охолодженої нижче від температури завершення мартенситного перетворення $M_3$ державки використовували функціональну залежність твердості сталі від тривалості загартовування (рис. 4), яка (залежність) отримана з даних, представлених на ТКД. Як видно з рис. 4, *а*, в інтервалі 10—1300 с дана залежність має приблизно експоненціальний характер, однак в значно меншому (10—200 с) інтервалі, протягом якого власне і відбувається загартування, цю

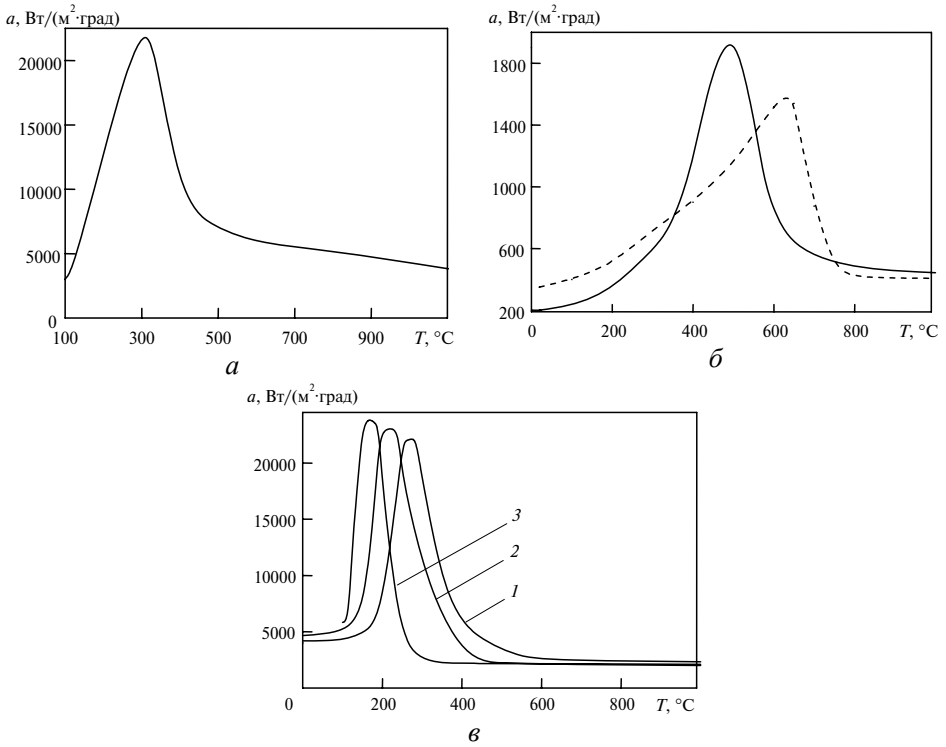


Рис. 2. Температурні залежності коефіцієнта теплообміну на поверхні металічного зразка при охолодженні у водному розчині солей і основ (*а*), у мастилах (*б*, суцільна лінія — легке мастило, штрихова — важке) та у воді (*в*, температура води — 20 (*1*), 60 (*2*), 100 (*3*) °С) (за даними [1]).

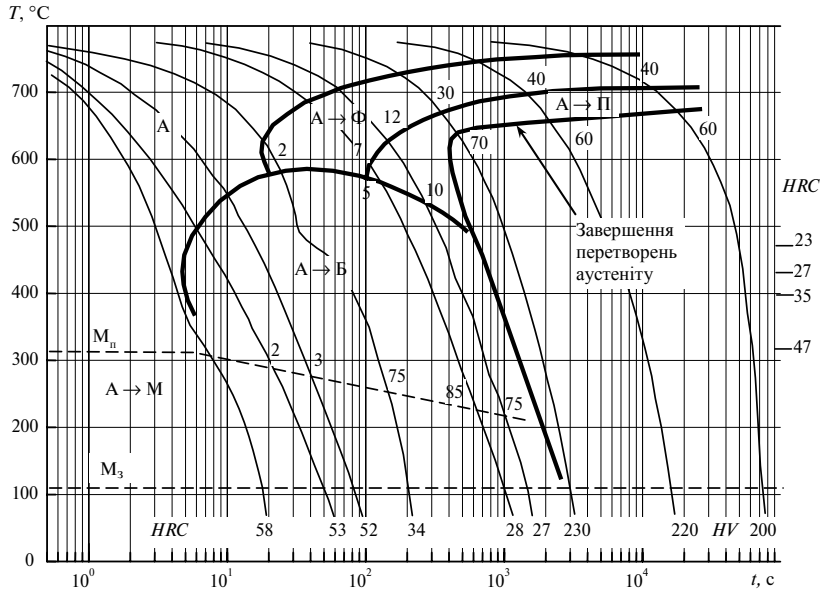


Рис. 3. Термокінетична діаграма перетворення переохолодженого аустеніту для сталі 35ХМ (замінника сталі 35ХГСА): А — аустеніт; Ф — ферит; Б — бейніт; П — перліт; М — мартенсит; $M_п$, $M_з$ — температура відповідно початку та завершення мартенситного перетворення аустеніту (штриховими лініями позначено температурні межі початку та завершення мартенситного перетворення для сталі 35ХГСА).

залежність можна прийняти лінійною (див. рис. 4, *б*). За результатами обчислень температурного поля в об'ємі різця було побудовано картини розподілу температури та графіки зміни температури в окремих точках об'єму державки в процесі гартування (траєкторії охолодження або ТКД-траєкторії). При цьому на дані графіки було нанесено криві, які зображують межі областей фазових перетворень на ТКД для даної сталі. Це дає змогу наочно оцінити результати загартування і, перш за все, визначити можливість досягнення певного рівня твердості точок загартованого приповерхневого шару державки.

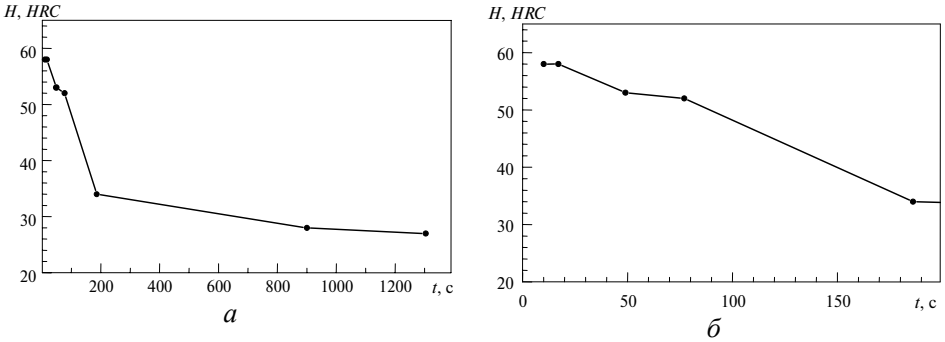


Рис. 4. Залежність твердості сталі 35ХГСА від тривалості загартування (в результаті охолодження до температур, нижчих від температури закінчення мартенситного перетворення в сталі).

**Результати чисельних експериментів.** Як показують результати чисельних досліджень процесу гартування державки різця в кожному зі вказаних вище трьох гартівних середовищ, траєкторії охолодження точок об'єму державки різця в кожному з них мають як спільні риси, так і свої особливості. З рис. 2, *а* і *в* видно, що значення коефіцієнта $\alpha(T)$ при охолодженні у водному розчині солей і основ та у воді для кожного значення температури $T$ з інтервалу 100—900 °С є величинами одного порядку, в той час як значення $\alpha(T)$ для мастил на порядок менші. Звідси випливає, що протікання процесів гартування в указаних перших двох рідинах має бути більш ідентичним, ніж в одній з них і в мастилах. Про це свідчать і результати обчислень (рис. 5—7). На цих рисунках момент часу $t$ = 65 с є моментом закінчення охолодження різця на повітрі при перенесенні його від індуктора в гартівну рідину і початком процесу гартування. Як бачимо, швидкості охолодження державки у водному розчині солей та основ і у воді є величинами практично одного порядку, тоді як швидкості охолодження в мастилах на порядок менші.

З рис. 5, *а, б* видно, що у водному розчині солей та основ з температурою 300 °С можна забезпечити швидкість охолодження більшу від критичної тільки для невеликої зони поверхні державки біля твердосплавної вставки (див. рис. 5, *б*, точка *1*), а на решті поверхні державки це здійснити неможливо. Тобто, в даній гартівній рідині з температурою 300 °С неможливо загартувати державку на найбільшу для даної сталі твердість.

З рис. 5—6 видно, що швидкість охолодження поверхні державки до температури 300 ºС у водному розчині солей і основ з температурою 300 °С є практично такою ж, як і у воді з температурою 100 °С, однак у першій рідині швидкість охолодження поверхні державки до температури 500 °С значно більша — майже вдвічі — ніж у другій. При гартуванні у воді з температурою 100 °С ТКД-траєкторії всіх точок поверхні державки потрапляють в область фазових перетворень аустеніту в бейніт протягом перших 6—8 с гарту-

вання ще при температурі 500—550 °С. Це робить неможливим загартування державки на найбільшу твердість для даної сталі, оскільки для досягнення найбільшої твердості, як видно із ТКД (див. рис. 3), необхідно здійснити охолодження до ~ 400 °С за 4,5—5,0 с. Проте з рис. 5, *а*, *б* та з використанням даних ТКД (див. рис. 3 і 4) можна зробити висновок, що в результаті загартування у воді з температурою 100 ºС можливо отримати твердість поверхні державки на рівні 53—55 *HRC*, тобто близьку до максимальної для даної сталі [1].

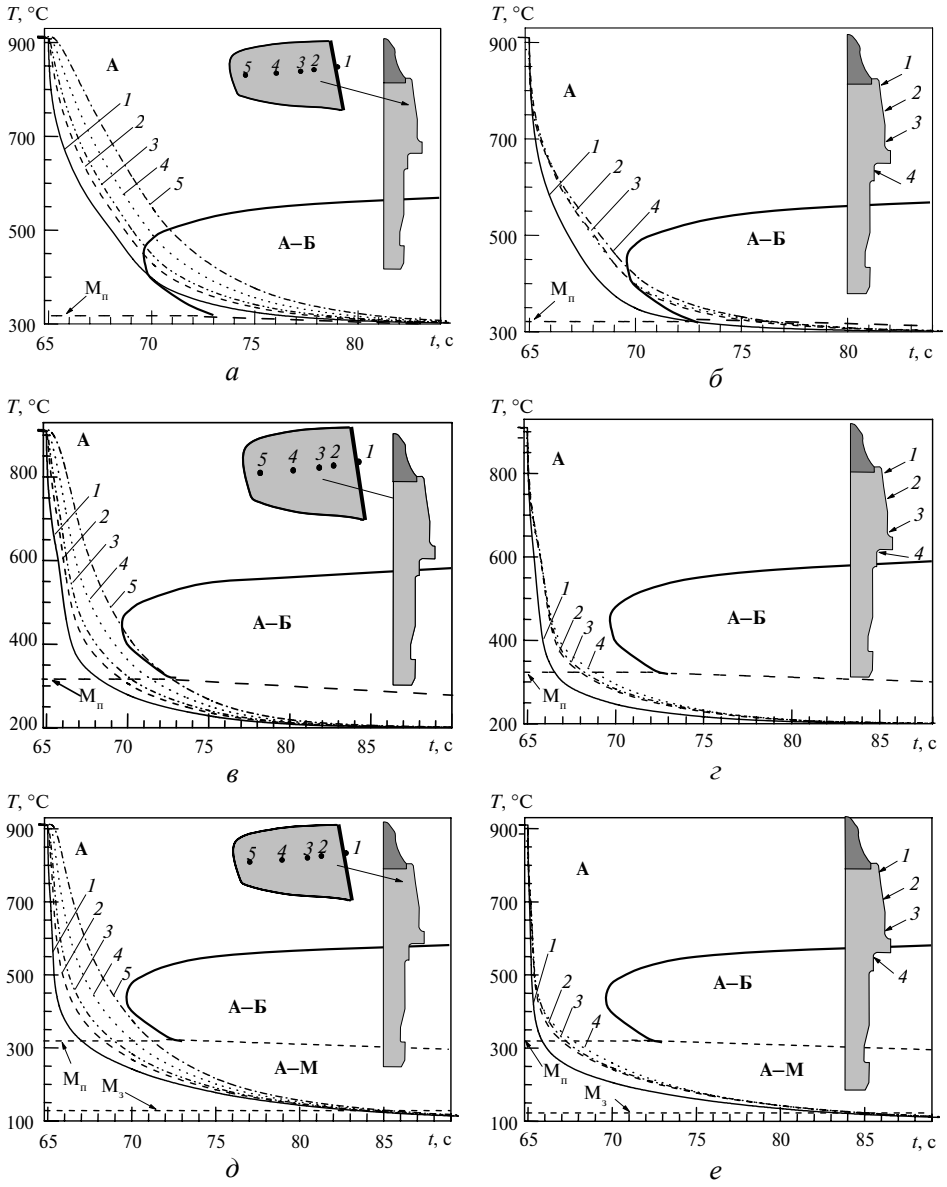


Рис. 5. Зміна в часі температури в точках приповерхневого шару державки та її поверхні в процесі загартовування у водному розчині солей і основ при різних температурах гартівної рідини: 300 (*а*, *б*), 200 (*в*, *г*), 100 (*д*, *е*) ºС; координати точок (*а*, *в*, *д*), м: 0,0123; 0,0676 (*1*), 0,0114; 0,0675 (*2*), 0,0109; 0,0675 (*3*), 0,0097; 0,0673 (*4*), 0,0081; 0,0671 (*5*).

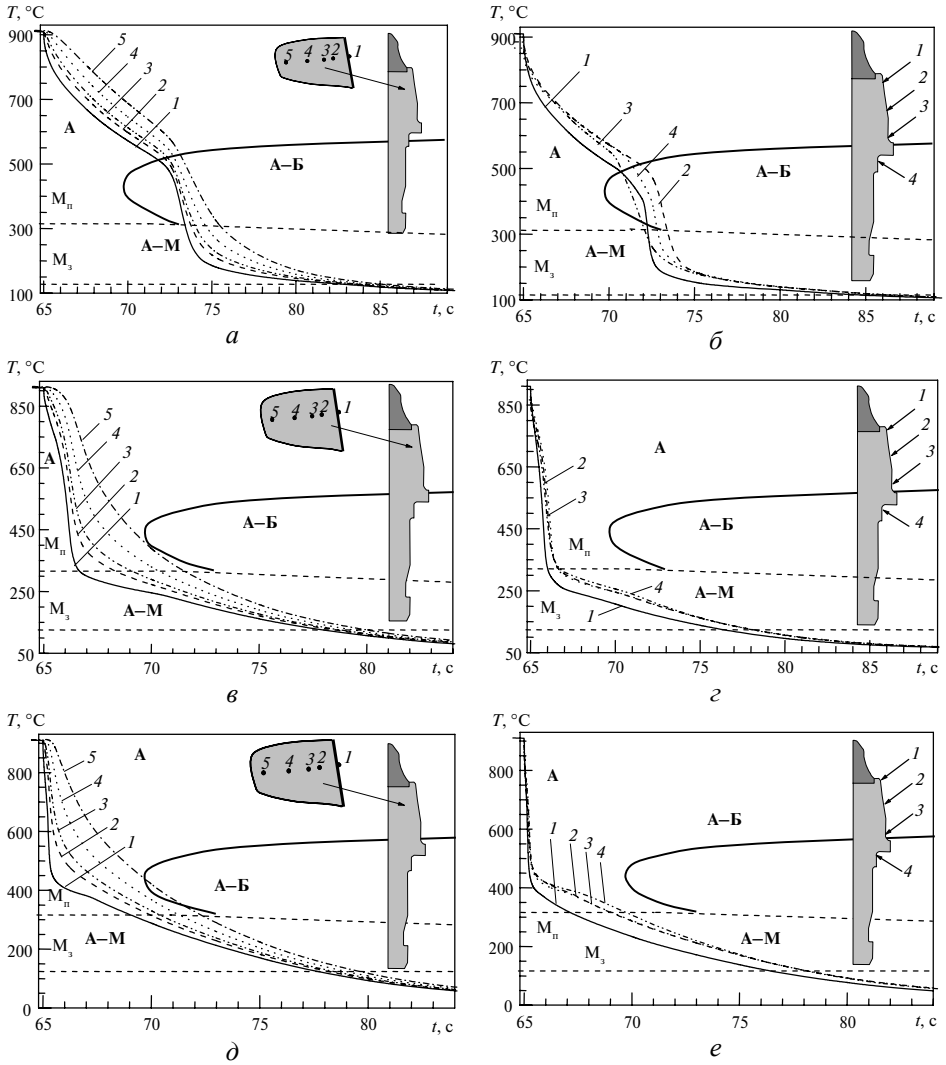


Рис. 6. Зміна температури в державці різця в процесі загартовування у воді з температурою 100 (*а*, *б*), 60 (*в*, *г*), 20 (*д*, *е*) ºС; координати точок див. на рис. 5.

Слід зазначити, що на відміну від гартування державки у воді з температурою 60 або 20 °С, під час загартовування її у воді з температурою 100 °С спостерігається своєрідна поведінка ТКД-траєкторій. При гартуванні у воді з температурою 100 °С після входження при 550—500 ºС ТКД-траєкторії в область фазових перетворень аустеніту в бейніт починається різке зростання швидкості охолодження державки. Причому (див. рис. 6, *а*, *б*) в процесі охолодження від 550—500 до 200 °С величина швидкості охолодження навіть перевищує критичну швидкість для даної сталі приблизно в півтора рази. Фактично завдяки цьому ефекту можна отримати вказані вище високі показники твердості поверхні державки в результаті загартування у воді з температурою 100 °С.

При гартуванні державки в легкому і важкому мастилах швидкість охолодження її поверхні настільки мала (в 7—20 разів (див. рис. 5—7)) порівняно з охолодженням у водному розчині солей і основ чи воді), що ТКД-траєкторії точок цієї поверхні потрапляють при температурі 550—570

°С в область фазових перетворень аустеніту в бейніт майже біля межі області перетворення аустеніту у ферит (див. рис. 7). Межу $M_з$ завершення мартенситного перетворення ТКД-траєкторії досягають в легкому мастилі приблизно за 135 с, а у важкому — за 90—95 с. Звідси випливає, що, згідно з даними ТКД (див. рис. 3, 4), в результаті загартування державки різця в легкому мастилі можна отримати твердість її поверхні на рівні 42 *HRC*, а при загартуванні у важкому мастилі — на рівні 50 *HRC*. Отже, в мастилах кімнатної температури неможливо загартувати поверхню державки на максимальну твердість.

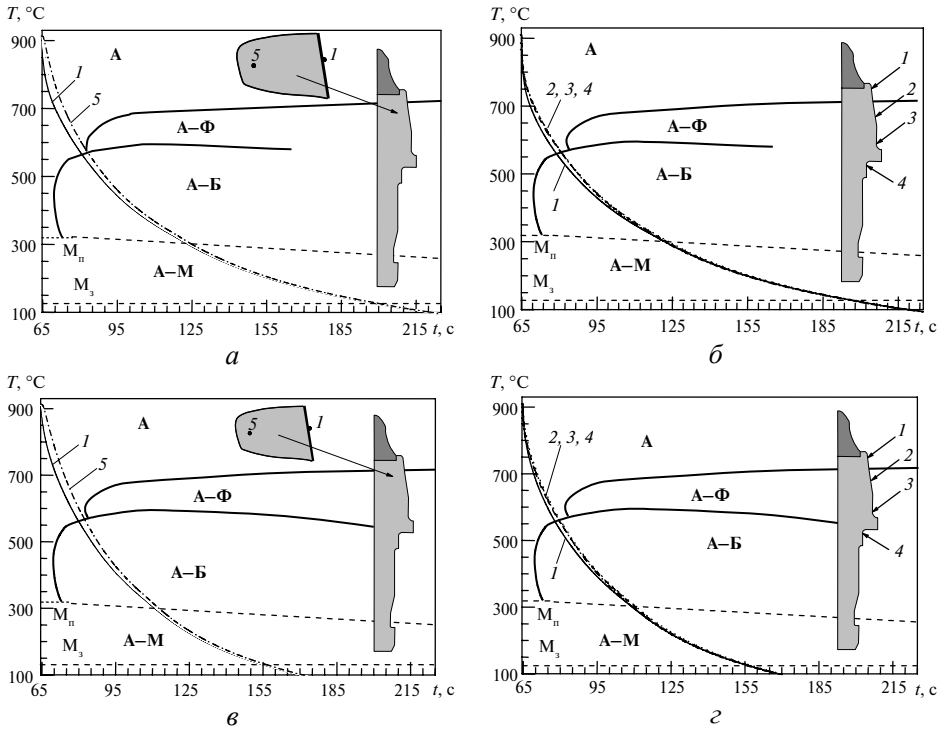


Рис. 7. Зміна температури в державці в процесі гартування в легкому (*а*, *б*) та важкому (*в*, *г*) мастилах при кімнатній температурі гартівної рідини; координати точок див. на рис. 5.

Співставивши результати чисельних досліджень поведінки ТКД-траєкторій в процесі гартування у воді різної температури та в легкому і важкому мастилах із характером температурної залежності коефіцієнтів конвективного теплообміну $\alpha(T)$ в цих рідинах можна помітити наступну закономірність. Зі зміщенням максимуму $\alpha(T)$ в сторону нижчих температур (див. рис. 2*б*, *в*) гартівна спроможність рідини зменшується.

Відомо, що зі зниженням температури гартівної рідини швидкість охолодження в ній зростає, що підтверджують результати обчислень (див. рис. 5, *в*—*е*, 6, *в*—*е*). Відповідно до цього збільшується товщина $h$ загартованого приповерхневого шару державки (див. рис. 5, *а*, *в*, *д*), зокрема і товщина шару державки, загартованого на максимально можливу для даної сталі твердість, — $h_{H_{\max}}$. За результатами чисельних досліджень загартування державки у водному розчині солей і основ різної температури побудовано графік залежності $h_{H_{\max}}$ від температури гартівної рідини (рис. 8). Величина $h_{H_{\max}}$ обчислена в зоні поверхні державки, вказаної стрілкою на рис. 5*а*. З рис. 8

видно, що при зменшенні температури гартівної рідини починаючи з 280 °С товщина загартованого приповерхневого шару державки $h_{H_{\max}}$ стає відмінною від нуля і почине зростати. Причому від 280 °С до температур 220—200 °С зростання відбувається скоріше, ніж при подальшому після 200 °С зростанні температури. Отримані дані можуть бути використані при виборі температури гартівної рідини.

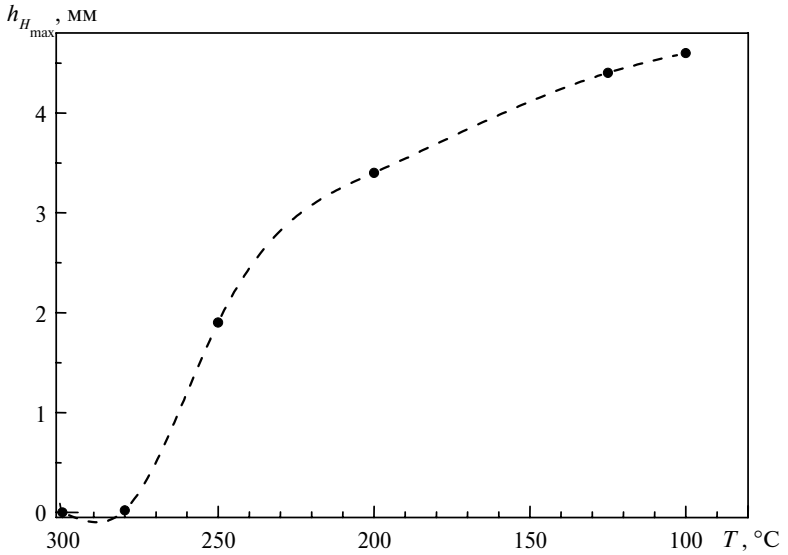


Рис. 8. Залежність товщини загартованого на максимальну твердість приповерхневого шару стальної державки твердосплавного різця від температури гартівної рідини — водного розчину солей і основ (кружечками позначено результати чисельного експерименту).

**Обговорення отриманих результатів.** Отримані прогнозні результати щодо рівня твердості та товщини загартованих приповерхневих шарів державки твердосплавного різця є приблизними, оскільки, наприклад, як дані про температурну залежність коефіцієнта конвективного теплообміну, так і дані для ТКД мають певну похибку (звичайно, крім похибки обчислень). Крім того, при моделюванні процесу гартування вважається, що охолодження твердосплавного різця починається одночасно в усіх точках його поверхні. В дійсності ж цей процес відбувається поступово, починаючи з охолодження тієї частини поверхні, яку першою занурюють в гартівну рідину. Проте отримані результати дають наочне уявлення про перебіг процесу загартовування і можуть бути корисними при виборі як гартівних середовищ, так і параметрів режиму загартування.

**Висновки**

На основі результатів чисельного дослідження процесу гартування стальної державки (сталь 35ХГСА) твердосплавного різця показано, що при загартуванні її у водному розчині солей і основ та у воді з певною температурою гартівної рідини можна досягнути рівня твердості поверхні державки близького до максимально можливого для даної марки сталі. При загартуванні ж у мастилах кімнатної температури досягнути максимальної твердості неможливо. Встановлено, що швидкості охолодження державки в процесі її загартовування у водному розчині солей і основ та у воді є величинами одного порядку, тоді як при гартуванні у мастилах швидкості охолодження поверхні, що загартовується, є майже на порядок меншими.

Показано, що на результати загартування впливає не лише величина коефіцієнта конвективного теплообміну при охолодженні стальної державки в певній гартівній рідині, а й характер його температурної залежності.

В результаті чисельного дослідження загартування державки у воді з температурою 100 ºС виявлено ефект різкого зростання — в 2—3 рази — швидкості охолодження при входженні ТКД-траєкторії в область фазового перетворення аустеніту в бейніт.

Для процесу загартування державки у водному розчині солей і основ отримано у вигляді графіка функціональну залежність товщини приповерхневого шару, загартованого на максимальну для даної сталі твердість, від температури гартівної рідини. Ці дані можна використати для прогнозування товщини загартованого приповерхневого шару та вибору температури гартівної рідини.

1. *Шмыков А. А.* Справочник термиста. — М.: Машгиз, 1961. — 392 с.
2. *Сорокин В. Г., Волосникова А. В., Вяткин С. А. и др.* Марочник сталей и сплавов. — М.: Машиностроение, 1989. — 640 с.
3. *Новіков М. В., Лукаш В. А., Вировець Л. М.* Створення вітчизняного виробництва ріжучого інструменту для дорожньо-фрезерних машин // Наука та інновації. — 2005. — **1**, № 3. — С. 112—117.
4. *Дутка В. А.* Комп'ютерне формування температурного поля твердосплавного різця для його індукційного паяння та гартування // Сверхтв. материалы. — 2008. — № 2. — С. 72—78.
5. *Дутка В. А.* Прогнозування зміцнення поверхні державки твердосплавного різця в результаті загартування після індукційного паяння // Там же. — 2008. — № 5. — С. 66—78.

Інститут надтвердих матеріалів
ім. В. М. Бакуля НАН України

Надійшла 03.02.09