

Оптимізація режимів відпалу швидкорізальної литої сталі

С. Є. Кондратюк, доктор технічних наук, професор, завідувач відділу
Ж. В. Пархомчук, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
zhanna.mom@ptima.kiev.ua
В. І. Вейс, провідний інженер

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

Литий інструмент простої конфігурації, виготовлений за технологією кокільного лиття з інтенсивним охолодженням при кристалізації із сталі Р6М5Л, характеризується дрібнозернистою структурою, підвищеною легованістю твердого розчину і твердістю 62-63 HRC, не потребує кінцевої механічної обробки. Інструмент складної конфігурації у зв'язку з необхідністю механічної обробки різанням піддають операції тривалого пом'якшуючого відпалювання. Рекомендації щодо скорочення тривалості відпалювання стосуються в основному прокату інструментальних сталей.

Досліджено ефективність відпалювання швидкоохолодженої при кристалізації сталі Р6М5Л за трьома технологічними режимами – відпал від 880 °С із безперервним охолодженням; з ізотермічною витримкою в інтервалі температур перлітного перетворення і найменшої стабільності аустеніту; відпал після аустенітизації з трикратним нагрівом до 750 °С і охолодженням до кімнатної температури. За результатами досліджень одержані рівняння регресії, що описують зміни твердості литої швидкоохолодженої сталі в межах 55-20 HRC, залежно від технологічної схеми відпалювання, температури і тривалості нагріву, швидкості охолодження виливків і дозволяють вибрати оптимальний режим відпалювання литого інструменту відповідно до вимог щодо його твердості і технологічних умов виробництва.

Ключові слова: термічна обробка, відпал, литий інструмент, швидкорізальна сталь.

Технологічні процеси лиття інструменту з використанням інтенсивного тепловідбору під час кристалізації розплаву швидкорізальних сталей ($V_{\text{ох}} = 10^2 - 10^3 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$) забезпечують суттєве подрібнення литої структури сталі типу Р6М5, зниження карбідної неоднорідності, підвищення легованості твердого розчину, реалізацію мартенситного перетворення і підвищення твердості сталі у виливках до 62-63 HRC. Традиційний трикратний відпуск литого інструменту при 500-550 °С забезпечує подальше підвищення його твердості до 65-66 HRC за рахунок дисперсійного зміцнення [1, 2].

Литий інструмент простої конфігурації може бути виготовлений з потрібною точністю і якістю поверхні без механічної обробки. Інструмент складної конфігурації (кінцеві та циліндричні фрези, зенкери) потребує механічної обробки литої заготовки різанням. У таких випадках висока

Термічна і хіміко-термічна обробка

твердість швидкоохолодженої литої заготовки неприйнятна і виникає необхідність проведення пом'якшуючого відпалу. Стосовно литих швидкорізальних сталей, рекомендації обмежуються підвищенням температури відпалювання на 40-50 °С і становлять 830-900 °С і вище. Це пов'язано з високим вмістом вольфраму у складі сталі, який суттєво підвищує температуру перлітного перетворення [3-5].

Практикою термічної обробки залежно від умов охолодження після аустенітизації при певних температурах розрізняють: відпал з безперервним охолодженням; ізотермічний відпал з витримкою сталі в інтервалі температур перлітного перетворення та найменшої стабільності аустеніту; циклічний відпал, що передбачує багаторазове нагрівання до температури перлітного перетворення і наступне охолодження до кімнатної температури [1, 4].

Швидкорізальна сталь характеризується низькою теплопровідністю і за умов термічної обробки виробу з неї прогриваються значно повільніше, тому при відпалюванні швидкорізальної сталі рекомендовано здійснювати нагрів її із швидкістю не вище 100-150 °С за годину. Оскільки температура початку перлітного перетворення різних марок швидкорізальних сталей знаходиться в межах 810-840 °С, то температуру відпалювання обирають 840-880 °С, тобто на 30-50 °С вище критичної точки. Для запобігання утворення великих карбідів і погіршення структури рекомендують мінімальну тривалість нагріву, достатню лише для повного прогрівання виробу. Незалежно від наведених схем відпалювання, охолодження до 600-650 °С рекомендовано здійснювати з регламентованою сповільненою швидкістю.

Зважаючи на застосування високих температур аустенітизації, ізотермічної витримки, тривалих режимів нагріву і охолодження відпал швидкорізальної сталі є досить складним багатогодинним процесом, що потребує значних витрат електроенергії. Рекомендації щодо скорочення часу та оптимізації режимів відпалу неоднозначні і базуються, головним чином, на дослідженнях деформівної сталі (прокату). Вони стосуються, як вже вказувалось, температури аустенітизації (до 900 °С і вище), тривалості нагріву (1-5 год), температур ізотермічного нагріву (720-770 °С) та його тривалості (1-8 год), швидкості охолодження (20-50 °С/год). Застосування відомих традиційних режимів відпалу не забезпечує потрібного зниження твердості литого швидкоохолодженого інструменту. Це зумовлено особливостями формування литої структури, перш за все умовами кристалізації і охолодження виливків після тверднення. З врахуванням цього, до актуальних проблем ливарного металознавства слід віднести розроблення і оптимізацію режимів відпалювання литих швидкорізальних сталей.

Дослідження проведені на виливках сталі Р6М5Л діаметром 50 мм і висотою 180 мм з твердістю 62-63 HRC після кристалізації і охолодженні у мідному водоохолоджуваному кокілі. Середня швидкість охолодження поверхні виливка 850 °С/с, центра 650 °С/с.

Термічну обробку виливків проведено за наступними технологічними схемами (рис. 1):

Термічна і хіміко-термічна обробка

- відпал з безперервним охолодженням: нагрів тривалістю 3 години при 880 °С; охолодження у печі зі швидкостями 20, 40, 50, 75, 150 і 250 °С/год до 600 °С; охолодження на повітрі до кімнатної температури;
- ізотермічний відпал: нагрів тривалістю 3 години при 880 °С; охолодження у печі із швидкістю 20, 40, 50, 75, 100, 150 і 250 °С/год до температури 750 °С; ізотермічний нагрів 3, 5 та 8 годин; охолодження з регламентованою швидкістю 250 °С/год до 600 °С; охолодження на повітрі до кімнатної температури;
- циклічний відпал: нагрів при 880 °С (3 год), охолодження у печі до 600 °С із швидкістю 20, 40, 50, 75, 100, 150 і 250 °С/год; охолодження до кімнатної температури; три цикли нагріву до 750 °С з витримуванням 1 год з охолодженням до 600 °С із швидкістю 250 °С/год; охолодження на повітрі до кімнатної температури.

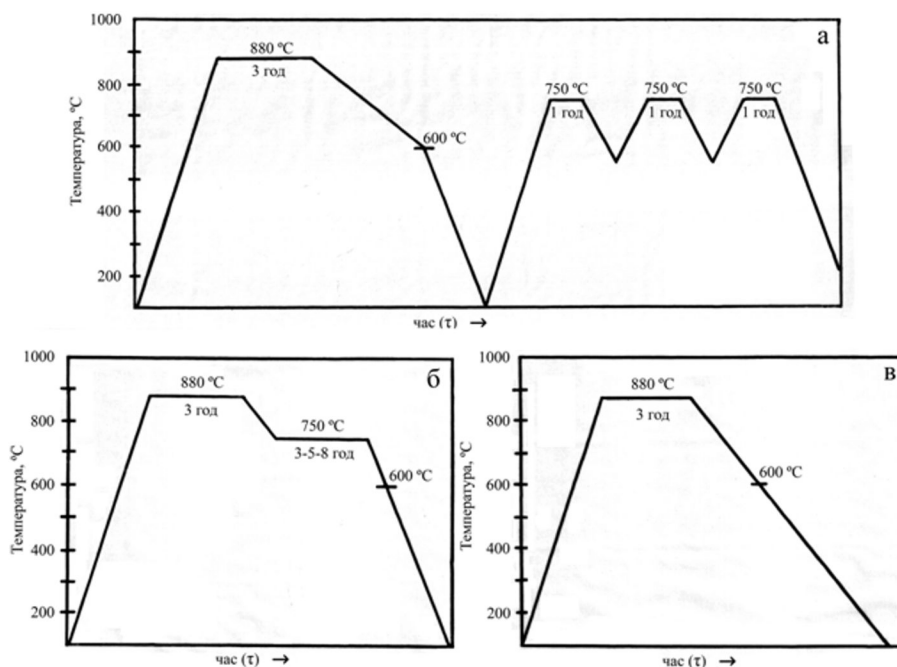


Рис. 1. Технологічні схеми відпалювання сталі Р6М5Л: а – циклічний відпал, б – ізотермічний відпал, в – відпал з безперервним охолодженням.

Показники твердості і тривалості термічної обробки за досліджуваними режимами відпалу наведено в таблицях 1 і 2. Обробка результатів експериментів засобами регресійного аналізу з виключенням незначущих регресорів на рівні $\alpha = 0,1$ [6] дозволила одержати рівняння взаємозв'язку твердості сталі і температурно-часових параметрів відпалу. Параметри варіювання режиму відпалювання: $V_{ох}$ – швидкість охолодження зразків (°С/с); тривалість ізотермічної обробки при 750 °С (год); τ_{Σ} – загальна тривалість обробки; N – кількість циклів нагріву до 750 °С.

Зміну показників твердості у межах дослідженого факторного простору ($20 \leq V_{ох} \leq 250$ °С/год; $0 \leq \tau \leq 8$ год; $0 \leq N \leq 3$) описують рівняння:

Термічна і хіміко-термічна обробка

Таблиця 1
Твердість HRC та тривалість термічної обробки сталі Р6М5Л залежно від режимів ізотермічного відпалювання

Швидкість охолодження, °С/год	Тривалість ізотермічного нагріву, год			
	0	3	5	8
20	<u>24</u>	<u>21</u>	<u>20</u>	<u>18</u>
	20,5	23,5	25,5	28,5
40	<u>27</u>	<u>25</u>	<u>22</u>	<u>19</u>
	13,5	16,5	18,5	21,5
50	<u>34</u>	<u>28</u>	<u>26</u>	<u>20</u>
	12,1	15,1	17,1	20,1
75	<u>36</u>	<u>33</u>	<u>30</u>	<u>20</u>
	10,2	13,2	15,2	12,2
100	<u>40</u>	<u>36</u>	<u>33</u>	<u>21</u>
	9,3	12,3	14,3	17,3
150	<u>46</u>	<u>38</u>	<u>35</u>	<u>26</u>
	8,4	11,4	13,4	16,4
250	<u>51</u>	<u>43</u>	<u>39</u>	<u>28</u>
	7,6	10,6	12,6	15,6

Примітка: над рискою – твердість HRC; під рискою – загальна тривалість термічної обробки з урахуванням тривалості нагріву до 880 °С (2,5 год).

- для відпалу з безперервним охолодженням
 $HRC = 25,65 + 0,115 V_{ox}; R = 0,93; \sigma_0 = 3,6;$ (1)
- для ізотермічного відпалу
 $HRC = 29,50 + 0,082 V_{ox} - 1,9 \tau; R = 0,93; \sigma_5 = 3,4;$ (2)
- для циклічного відпалу
 $HRC = 29,90 + 0,05 V_{ox} - 3,52 N; R = 0,68; \sigma_0 = 4,4,$ (3)

де R – коефіцієнт кореляції,
 σ_0 – залишкове середньоквадратичне відхилення.

Графічна інтерпретація цих рівнянь наведена на рис. 2.

Загальну тривалість термічної обробки (τ_{Σ} , год) за умов відпалу з безперервним охолодженням описує рівняння:

$$\tau_{\Sigma} = 6,5 + 280 / V_{ox}, \text{ год}; R = 0,99; \sigma_0 = 0,01; \quad (4)$$

- за умов ізотермічного відпалу
 $\tau_{\Sigma} = 6,5 + \phi + 280 / V_{ox}; R = 0,99; \sigma_0 = 0,01; \quad (5)$

- за умов циклічного відпалу
 $\tau_{\Sigma} = 6,5 + 3,1 N + 280 / V_{ox}, \text{ год}; R = 0,99; \sigma_0 = 0,01. \quad (6)$

Термічна і хіміко-термічна обробка

Таблиця 2

Твердість HRC та тривалість термічної обробки сталі Р6М5Л
залежно від режимів циклічного відпалювання

Швидкість охолодження, °С/год	Кількість циклів нагріву			
	0	1	2	3
20	<u>24</u>	<u>23</u>	<u>22</u>	<u>22</u>
	20,5	23,6	26,7	29,8
40	<u>27</u>	<u>25</u>	<u>23</u>	<u>23</u>
	13,5	16,6	19,7	22,8
50	<u>34</u>	<u>28</u>	<u>29</u>	<u>25</u>
	12,1	15,2	18,3	21,4
75	<u>36</u>	<u>31</u>	<u>30</u>	<u>26</u>
	10,2	13,3	16,4	19,5
150	<u>46</u>	<u>32</u>	<u>31</u>	<u>27</u>
	8,4	11,5	14,6	17,7
250	<u>51</u>	<u>32</u>	<u>31</u>	<u>27</u>
	7,6	10,7	13,8	16,9

Примітка: над рискою – твердість HRC; під рискою – тривалість термічної обробки з урахуванням тривалості нагріву до 880 °С (2,5 год).

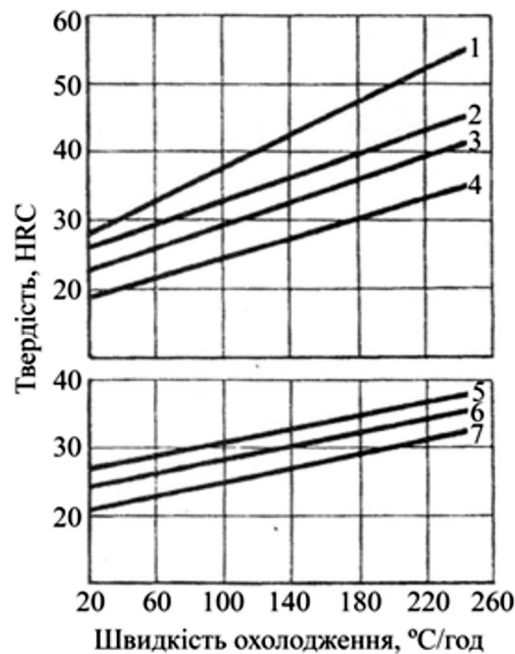


Рис. 2. Твердість сталі Р6М5Л залежно від швидкості охолодження при різних режимах відпалювання: 1 – безперервне охолодження ($N = 0$, $\tau = 0$); 2, 3, 4 – ізотермічний відпал ($N = 0$, $\tau = 3, 5, 8$ год відповідно); 5, 6, 7 – циклічний відпал ($N = 1, 2, 3$ відповідно, $\tau = 1$ год).

Термічна і хіміко-термічна обробка

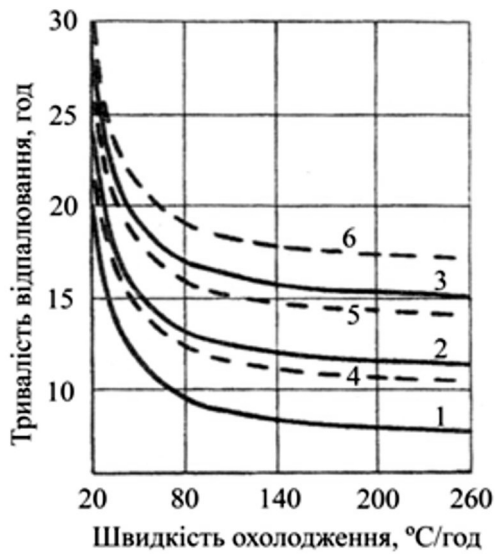


Рис. 3. Тривалість термічної обробки за умов відпалювання. 1 – з безперервним охолодженням, 2, 3 – ізоермічний відпал, 4, 5, 6 – циклічний відпал.

Графічна інтерпретація цих рівнянь показана на рис. 3.

Металографічними дослідженнями встановлено, що при твердості нижчій від 30 HRC, тобто після практично завершеного процесу перетворення при відпалі, мікроструктура сталі представлена феритоцементитною сумішшю (в осях дендритів) з дисперсною евтектикою по границях дендритів і суттєво не залежить від вибраної технологічної схеми відпалювання (рис. 4). Наявність невеликої кількості евтектичних утворень характерна для центральної зони виливків. Незавершеності процесів перетворення при відпалі відповідає невелика присутність у структурі сталі мартенситної складової і більш висока твердість.

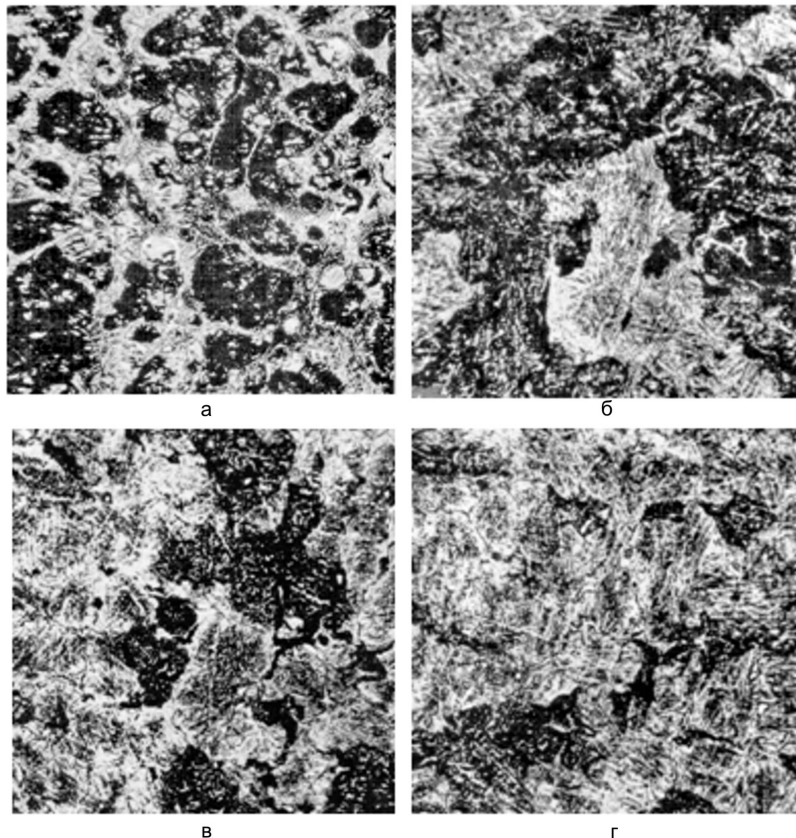


Рис. 4. Структура швидкоохолодженої при кристалізації сталі Р6М5Л (а) після різних режимів відпалювання: з безперервним охолодженням (б), ізоермічний відпал (в), циклічний відпал (г). $\times 400$.

Термічна і хіміко-термічна обробка

Відповідно до отримання результатів загальну тривалість відпалу зумовлюють швидкість охолодження після аустенітизації та тривалість ізотермічної обробки при температурі 750 °С. Залежно від вимог щодо твердості литої заготовки інструменту і технологічних можливостей виробництва може бути вибраний найбільш раціональний режим відпалу литої швидкорізальної сталі.

Література

1. Геллер Ю.А. Инструментальные стали М.: Металлургия, 1951. – 510 с.
2. Позняк Л.А. Инструментальные стали Киев: наук. думка, 1996. – 487 с.
3. Бялік О.М., Черненко В.М., Писаренко В.М., Москаленко Ю.Н. Металознавство, Київ: «Політехніка», 2001. – 375 с.
4. Капля С.Н., Ульшин В.И., Кононенко О.Ю., Баглюк Г.А. Отжиг горячештампованной порошковой быстрорежущей стали с добавками бора // Порошковые инструментальные стали: Сб. научн. тр. НАН України Ін-т матеріалознавства ім. І.Н. Францевича. – Київ. 1992. – С. 41-42.
5. Гогаев К.А., Ульшин В.И. Порошковая металлургия инструментальных сталей, – Донецк: «Наулідж», 2012. – 368 с.
6. Сербер Дж. Линейный регрессионный анализ / пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 272 с.

References

1. Geller Yu.A. *Instrumentalnyye stali* (Tool steels), Moscow: Metallurgiya, 1951, 510 p. [in Russian].
2. Poznyak L.A. *Instrumentalnyye stali* (Tool steels), Kiyev: Nauk. dumka, 1996, 487 p. [in Russian].
3. Byalik O.M., Chernenko V.M., Pysarenko V.M., Moskalenko Yu.N. *Metaloznnavstvo* (Metal Science), Kyiv: «Politekhnik», 2001, 375 p. [in Ukrainian].
4. Kaplya S.N., Ulshin V.I., Kononenko O.Yu., Baglyuk G.A. *Otzhig garyacheshtampovannoy poroshkovoy bystrorezhushchey stali s dobavkami bora*, Poroshkovyye instrumentalnyye stali: Sb. nauchn. tr. NAN Ukraini Hn-t materialoznavstva im. H.N. Frantsevicha, Kyiv. 1992, pp. 41-42 [in Russian].
5. Gogayev K.A., Ulshin V.I. *Poroshkovaya metallurgiya instrumentalnykh staley* (Powder metallurgy of tool steels), Donetsk: «Naulidzh», 2012, 368p. [in Russian].
6. Serber Dzh. *Lineynyy regressiionnyy analiz* (Linear regression analysis), Moscow: Mir, 1980, 272 p. [in Russian].

Одержано 08.12.19

С. Е. Кондратюк, Ж. П. Пархомчук, В. И. Вейс

Оптимизация режимов отдыха литого инструмента из стали Р6М5Л

Резюме

Литой инструмент простой конфигурации, изготовленный по технологии кокильного литья с интенсивным теплоотводом при кристаллизации из стали Р6М5Л характеризуется

Термічна і хіміко-термічна обробка

мелкозернистой структурой, повышенной легированостью твердого раствора и твердостью 62-63 HRC, не требует окончательной механической обработки. Инструмент же сложной конфигурации в связи с необходимостью механической обработки резанием подвергаются операции длительного умягчающего отжига. Рекомендации относительно сокращения продолжительности отжига относятся в основном к прокату инструментальных сталей.

Исследована возможность сокращения продолжительности отжига быстроохлажденной при кристаллизации стали Р6М5Л с применением различных режимов отжига: с непрерывным охлаждением от 880 °С; с изотермической выдержкой в интервале температур перлитного превращения и наименьшей стабильности аустенита; циклического отжига с трехкратным нагревом до 750 °С и охлаждением до комнатной температуры.

По результатам исследований получены уравнения регрессии, описывающие изменение твердости литой быстроохлажденной стали в пределах 55-20 HRC в зависимости от технологической схемы отжига, температуры и продолжительности нагрева, скорости охлаждения отливки, которые позволяют выбрать оптимальный режим отжига литого инструмента в соответствии с требованиями обеспечения нужной твердости и технологических условий производства.

Ключевые слова: термическая обработка, отжиг, литой инструмент, быстрорежущая сталь.

S. Ye. Kondratyuk, Z. V. Parkhomchuk, V. I. Veis

Optimization of annealing modes of cast tool made of R6M5L steel

Summary

A simple configuration cast tool made by the technology of chill casting with intensive cooling during crystallization from R6M5L steel is characterized by a fine-grained structure, increased alloying of the solid solution and a hardness of 62-63 HRC; it does not require final machining. A tool of complex configuration due to the need for its mechanical processing by cutting is subjected to extended softening annealing. Recommendations for reducing the annealing time relate mainly to the rolling of tool steels.

The efficiency of annealing of rapidly chilled R6M6L steel during crystallization by three technological modes is investigated: annealing at 880 °C with continuous cooling; with isothermal exposure in the temperature range of pearlite transformation and the least stability of austenite; annealing after austenitization with triple heating to 750 °C and cooling to room temperature. Based on the research results, regression equations were obtained that describe changes in the hardness of cast rapidly cooled steel within 55-20 HRC depending on the technological annealing scheme, temperature and duration of heating, cooling rate of castings and allow choosing the optimal annealing mode of the cast tool in accordance with the requirements for its hardness and technological conditions of production.

Keywords: thermal treatment, annealing, cast tool, high-speed steel.