

## ПІДВИЩЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПЛАСТИЧНОСТІ ПІД ЧАС ЗБЕРЕЖЕННЯ МІЦНОСТІ ХОЛОДНОКАТАНОЇ ТОНКОЛИСТОВОЇ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ

Дощечкіна І. В.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

**Анотація.** Розроблена і досліджена швидкісне знеміцнювальне оброблення холоднокатаної тонколистової сталі 08кп з використанням контактного нагрівання та охолодження. Установлені оптимальні температурно-часові параметри процесів рекристалізаційного відпалу та подальшого перестарювання для запобігання природного старіння за тривалого вилежування або в процесі транспортування сталі. Розроблена технологія термічного оброблення холоднокатаного листа забезпечує комплекс властивостей, які відповідають підвищеним вимогам споживача для виготовлення двошарових згорнутопаяних трубок малого діаметра, що експлуатуються під великим тиском. Такі трубки виготовлені зі стрічкових заготовок, що були оброблені за рекомендованою технологією, успішно пройшли стовідсотковий контроль якості в умовах виробництва.

**Ключові слова:** тонкий лист, холоднокатана сталь 08кп, швидкісне контактне нагрівання та охолодження, рекристалізаційний відпал, перестарювання, природне старіння, структура, міцність, технологічна пластичність, холодна пластична деформація.

### Вступ

У виробництві різних видів металопродукції значне місце займає тонколистовий прокат, який завдяки своїм технологічним і експлуатаційним властивостям, а також економічним показникам дуже широко використовується в різних галузях народного господарства для виготовлення металопродукції і деталей, зварних труб і гнутих профілів методами холодного деформування.

Питання особливості виробництва і покращення якості цього виду металопродукції знаходяться під постійною увагою як виробників, так і споживачів. Вирішення цієї важливої проблеми передбачає розроблення нових сталей, створення більш досконалого виду обладнання, впровадження нових прогресивних технологій оброблення для підвищення як технологічних, так і службових характеристик.

Останнім часом все частіше використовуються нові типи сталей (ДФМС, ІФ, TRIP-сталі тощо) підвищеної міцності і достатньо пластичних без погіршення здатності до холодного деформування. Такі сталі, безумовно, необхідні для елементів силових каркасів машин. Для металопродукції, що потребує забезпечення високого рівня технологічності матеріалу для складних процесів холодного деформування в процесі виготовлення і не підлягає значним навантаженням під час експлуатації, як і раніше, широко застосовують листові низьковуглецеві сталі.

З листового прокату сталей 08кп, 08Ю, товщиною 0,5–0,8 мм, виготовляють двошарові згорнутопаяні трубки для гідравлічних систем дорожньо-будівельних та сільськогосподарських машин, автомобілів, приборів, а також для агрегатів побутового використання. Технологія виробництва таких трубок вимагає різноманітних видів складної холодної пластичної деформації (розтягування, розбортовування, загинання, обтиснювання, сплющування з перекриттям кромки) для здійснення процесів формозміни, отже, сталь повинна мати високу пластичність [1]

Крім того, до двошарових згорнутопаяних трубок висуваються вимоги вібростійкості, надійності за знакозмінних навантажень, здатності витримувати значний внутрішній тиск, точності геометрії, високої якості внутрішньої і зовнішньої поверхні

З урахуванням технологічних і експлуатаційних особливостей виробу в роботі вирішувалося актуальне питання щодо забезпечення холоднокатаної сталі 08кп високою технологічною пластичністю за достатньої міцності та запобігання її природного старіння.

На вітчизняних металургійних комбінатах традиційним способом термічного оброблення тонколистового холоднокатаного прокату сталей 08кп, 08пс, 08Ю, призначених для виготовлення виробів методами холодної деформації є рекристалізаційний відпал ру-

лонів у садочних ковпакових печах [2, 3]. Метою відпалу є отримання однорідного зерна, відновлення пластичності, забезпечення необхідної деформованості під час холодного оброблення металу тиском.

Однак ковпаковий спосіб знеміцнення сталі має декілька специфічних недоліків: тривалість процесу, значні витрати електроенергії, нерівномірність нагрівання рулонів і неоднорідність структури та властивостей за довжиною та шириною листа, незадовільна якість його поверхні.

Ефективною та продуктивною є технологія швидкісного безперервного термічного оброблення в протяжних агрегатах, що об'єднує в єдиному процесі рекристалізаційний відпал та перестарювання для знеміцнення холоднокатаної сталі, забезпечення стабільності властивостей і запобігання її природного старіння. Таке оброблення триває до 20 хвилин на різноманітних агрегатах [4,5], але таке різке скорочення часу висуває певні вимоги. Рекомендується застосовувати низьковуглецеві сталі (0,05–0,06% C), які менш схильні до деформаційного старіння після прискореного нагрівання й охолодження в процесі відпалу. Досить неоднозначною є інформація щодо температурно-часових режимів відпалу й перестарювання різних сталей.

Необхідно зазначити, що відпал у ковпакових печах не забезпечує необхідного рівня властивостей, згідно з регламентованою документацією споживача, ( $\sigma_{\text{в}} = 340\text{--}350$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 300\text{--}320$  МПа,  $\delta$  – не менше 33 %) тонколистових заготовок зі сталі 08кп для двошарових згорнутопаяних трубок, які експлуатуються в умовах значного робочого тиску від 300 до 450 кгс / см<sup>2</sup>.

У зв'язку з цим питання розроблення нових методів оброблення для вирішення проблеми поєднання суперечливих вимог підвищення технологічної пластичності холоднокатаної сталі в процесі одночасного збільшення міцності та покращення якості листа є на сьогодні актуальним і має практичне значення.

#### Мета і постановка завдання

Мета роботи – забезпечити холоднокатаній тонкій смузі зі сталі 08 кп достатню міцність у процесі підвищення технологічної пластичності для бездефектного виготовлення двошарових згорнутопаяних трубок малого діаметра.

Для реалізації мети вирішувалися такі завдання: дослідження та визначення оптима-

льних температурно-часових параметрів швидкісного контактного рекристалізаційного відпалу й перестарювання тонких стрічкових заготовок для отримання заданого комплексу експлуатаційних властивостей та упередження природного старіння.

#### Дослідження структури та властивостей сталі 08кп після швидкісних режимів рекристалізаційного відпалу та перестарювання

У процесі дослідження використовували холоднокатану маловуглецеву листову сталь 08 кп, товщиною 0,6 мм, серійного плавлення на металургійному комбінаті.

У вихідному стані після прокатування із 60ти відсотковим обтисненням сталь мала текстуровану структуру із середнім розміром феритного зерна 50–60 мкм і такими властивостями:  $\sigma_{\text{в}} = 810$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 640$  МПа,  $\delta \sim 2$  %.

Холоднокатані стрічки піддавали швидкісному рекристалізаційному відпалу за температури 650–720 °С з витримкою 5, 10 та 15 с на обладнанні з теплообмінними контактними барабанами. Стрічка з рулону надходить до печі, всередині якої послідовно обгинає два нагрітих барабани і в процесі контактування з їхніми поверхнями відпалюється. На виході з печі стрічка потрапляє на водоохолоджувальні ролики, а потім змотується в рулон.

Температура нагрівання поверхні барабанів була в межах від 640 до 800 °С. Швидкість нагрівання і охолодження стрічки (100 і 80 °С/с відповідно) визначалася швидкістю протягування її в приладі. Процес охолодження здійснювали до кімнатної температури.

Після рекристалізаційного відпалу металеві стрічки підлягали дресируванню – прокатуванню з обтисненням 1,5%. Як відомо, після дресирування сталь має кращі витяжні властивості та якість поверхні стрічок.

Для попередження деформаційного старіння відпалену сталь піддавали перестарюванню за температури 400 °С. Час перестарювання варіювався від 2 с до 2 хв. Наші попередні дослідження свідчать про недоцільність підвищення температури та більш тривалої витримки.

Ефективність відпалу та перестарювання оцінювали за мікроструктурою сталі та її механічними властивостями як безпосередньо після термічного оброблення, так і після природного старіння протягом 30 діб.

Дослідження макроструктури здійснювали за допомогою металографічного мікроскопа UIT MicroMet –I–102 BD та електронного мікроскопа РЕМ-106.

Механічні властивості визначали після випробування на розтягування за стандартними методиками. Для підрахунку розміру зерен і визначення дисперсії в їхньому розподілі за величиною використана спеціальна комп'ютерна програма.

Як демонструють дослідження, швидкісний відпал за 650 °С з витримкою 5 с майже повністю ліквідує текстуру деформованої сталі, але зерно фериту залишається великим – середній розмір становить 40–45 мкм (рис. 1, а), якій відповідає 6 номеру шкали оцінювання розмірів зерен. Після витримки 10 с поруч із зернами, розміром 35 мкм, з'являються дрібні зерна, що є наслідком початку рекристалізації (рис. 1, б).

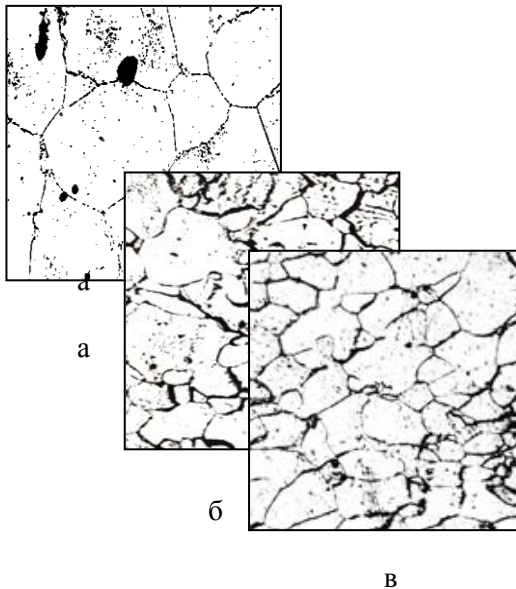


Рис. 1. Мікроструктура сталі 08кп після відпалу при 650 °С із витримкою: а – 5 с ; б – 10 с; в – 15 с; х 500

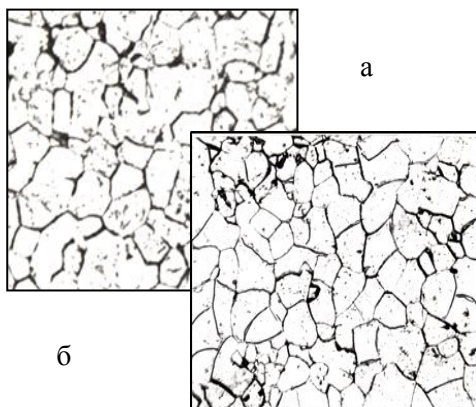


Рис. 2. Мікроструктура сталі 08кп після відпалу при 700 °С із витримкою: а – 5 с; б – 15 с; х 500

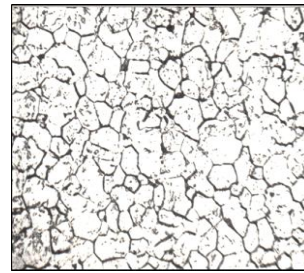


Рис. 3. Мікроструктура сталі 08кп після відпалу при 720 °С із витримкою 15 с, х 500

За умови збільшення часу витримки до 15 с фіксується здрібнення зерна до 25–30 мкм. Однак зберігається різнозернистість – фіксуються зерна, розміром до 10 мкм (рис. 1, в).

Відпал за температури 700 °С з витримкою 5 с забезпечує подрібнення зерна до 23–25 мкм за певної неоднорідності їх за розмірами (рис. 2, а). Збільшення часу витримки до 15 с підвищує ступінь однорідності структури за подальшого здрібнення зерна до 18–20 мкм, що відповідає 8 номеру шкали (рис. 2, б).

При підвищенні температури до 720 °С з витримкою 15 с частина зерен мають розмір 11–12 мкм, але існують зерна значно більших розмірів (рис. 3).

Розмір зерна має значний вплив на деформувність сталі. Занадто дрібне зерно фериту зміцнює сталь, а велике призводить до зниження ударної в'язкості та окрихчення. В обох випадках мають місце складнощі з деформуванням сталі.

Як свідчать літературні джерела [4,6,7], найкращим як щодо комплексу властивостей для оброблення сталі тиском в холодному стані, так і щодо якості поверхні листа є розмір зерна 7–8 номера.

Показники механічних властивостей, згідно з мікроструктурними дослідженнями, підтверджують, що оптимальним режимом рекристалізаційного відпалу є нагрівання за 700 °С із витримкою 15 с. У цьому випадку суттєво зростає пластичність (відносне подовження збільшується з 14 до 30 %) і значно знижуються показники міцності (рис. 4)

Підвищувати температуру недоцільно як з точки зору пластичності, так і міцності сталі.

У процесі відпалу в умовах дуже швидкого нагрівання й охолодження  $\alpha$ -твердий розчин пересичений надлишковою кількістю вуглецю та азоту, які не встигають виділитися, і метал знаходиться у нерівноважному стані.

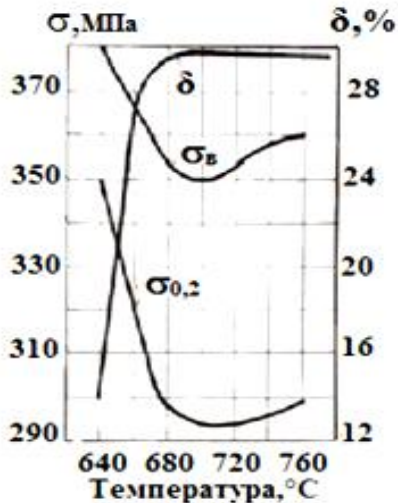
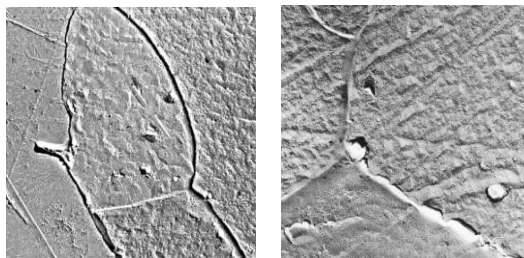
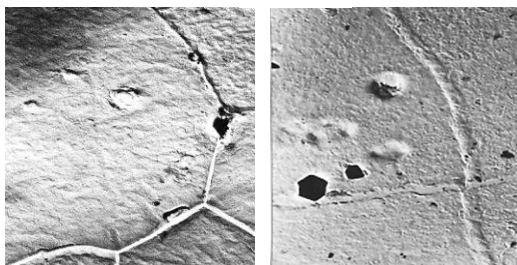


Рис. 4. Механічні властивості сталі 08 кп після відпалу за 700 °С із витримкою 15 с та вилежування протягом доби

З часом у процесі вилежування, транспортування до споживача або під час подальших переділах прокату, коли процес відбувається повільно, ферит позбувається зайвої кількості цих елементів через виділення карбідів та нітридів (рис. 5). Відбувається деформаційне старіння сталі, а отже, погіршується здатність її до деформування.



а



б

Рис. 5. Мікроструктура сталі 08 кп після відпалу за 700 °С з витримкою 15 с та деформаційного старіння протягом 5 діб (а) і місяця (б);  $\times 10000$

Як демонструють результати дослідження, після вилежування протягом 5 діб рекристалізованого за 700 °С з витримкою 15 с сталевий лист його відносне подовження  $\delta$  зменшилося на 2 % (з 30 до 28 %), а характеристики міцності значно підвищилися. Протягом місяця пластичність  $\delta$  впала до 14 %, показники міцності збільшилися несуттєво (рис. 6).

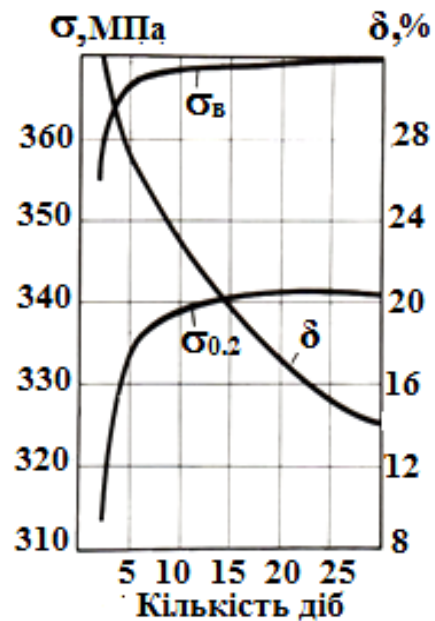


Рис. 6. Механічні властивості сталі 08кп після відпалу за 700°С з витримкою 15 с та вилежування протягом місяця

У рекристалізованого за 750 °С з витримкою 15 с листа після вилежування протягом місяця відносне подовження  $\delta$  зменшилося від 30 % до 8 %, а характеристики міцності, зокрема межа течності суттєво зросли (рис. 7).

Результати дослідження демонструють, що ефект старіння є сильнішим за умови, якщо час витримки є більшим за температури відпалу та вищою є сама температура. Це зумовлено більш повним розчиненням вуглецю в  $\alpha$ -фазі зі збільшенням температурно-часових параметрів відпалу.

Щоб запобігти ефекту старіння й отримати стабільні механічні властивості сталь після рекристалізаційного відпалу піддавали подальшому термообробленню – перестарюванню.

Перестарювання за 400 °С з витримкою 15 с забезпечує пластичність на рівні 31 %. Після п'яти діб вилежування пластичність зменшується до 30 % за умови незмінних показників міцності.



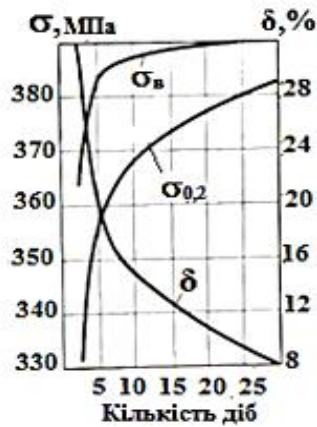


Рис. 7. Механічні властивості сталі 08 кп після відпалу за 750 °С з витримкою 15 с вилежування протягом місяця

Після 30 діб пластичність відпаленої сталі знижується до 26 %, характеристики міцності мають тенденцію до зростання (рис. 8).

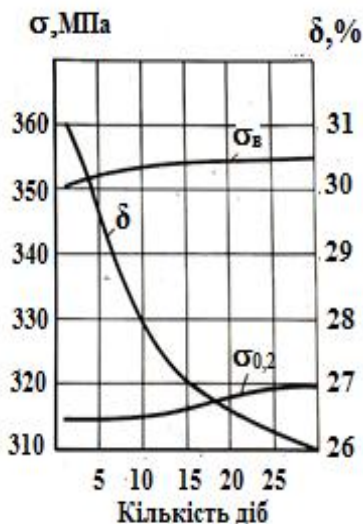


Рис. 8. Механічні властивості сталі 08 кп після відпалу за 700 °С, (витримка 15 с), перестарювання (витримка 30 с) та природного старіння

Зі збільшенням часу витримки в процесі перестарювання до 2 хвилин відчутний ефект його позитивного впливу на стабілізацію процесів природного старіння (рис. 9). Так, після 5 діб вилежування пластичність знизилася з 34,5 до 33,5 %, тимчасовий опір майже не змінився, а межа течкості збільшилася з 315 до 323 МПа.

Після вилежування протягом місяця механічні характеристики залишилися незмінними. Таку стабілізацію механічних властивостей з плином часу можна пояснити

повним очищенням твердого розчину від надлишкового вмісту вуглецю та шкідливих домішок і забезпеченням рівноважного стану структури.

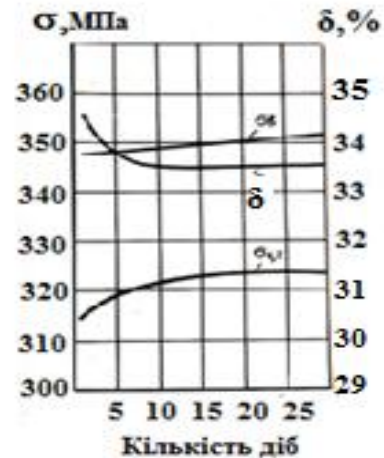


Рис. 9. Механічні властивості сталі 08 кп після відпалу за 700 °С (витримка 15 с), перестарювання (витримка 2 хв) та природного старіння

Стрічки, оброблені за двостадійним режимом термічного оброблення, були порізані на смуги для виготовлення двошарових згорнутопаяних трубок, діаметром 8 мм, із перекриттям від 1,0 до 1,2 мм для спаювання.

Під час проходження стовідсоткового контролю спаяних трубок в умовах виробництва визначена їхня задовільна якість як за властивостями, так і за станом поверхні.

### Висновки

1. Найкращим режимом контактного швидкісного ( $100^{\circ}\text{C/s}$ ) рекристалізаційного відпалу є нагрівання до 700 °С з витримкою 12 с, яке забезпечує холоднокатаній тонколистовій сталі 08 кп комплекс властивостей ( $\sigma_B = 350$  МПа;  $\sigma_{0.2} = 295$  МПа,  $\delta = 30\%$ ), що відповідає згідно з ГОСТ 9045-93 категорії ВГ, тобто здатності сталі до холодного складного деформування.

2. Подальше деформаційне старіння протягом місяця відпаленої за швидкісним режимом сталі 08 кп призводить до різкого падіння пластичності ( $\delta$  в 2,5 рази) та підвищення міцності.

3. Двоступеневе знеміцнювальне швидкісне термічне оброблення, що складається з рекристалізаційного відпалу за 700 °С з витримкою 12 с і подальшого перестарювання за 400 °С протягом 2 хв, підвищує як міцність, так і пластичність ( $\sigma_B = \sim 350$  МПа,  $\sigma_{0.2} = 315\text{--}323$  МПа,  $\delta = 33,5\%$ )

холоднокатаної сталі 08 кп і запобігає її старінню під час вилежування протягом одного місяця. Отримані властивості відповідають регламентованим вимогам споживача до заготовок, призначених для виготовлення двошарових згорнутопаяних трубок, що експлуатуються в умовах підвищеного тиску.

4. Згорнутопаяні двошарові трубки малого діаметра, що були виготовлені зі сталевих смуг, оброблених за розробленими режимами, успішно пройшли контроль якості в умовах виробництва як за рівнем властивостей, так і за якістю поверхні.

### Література

1. Прудникова О. Р., Щербаков Э. Д., Лапин В. П. Выбор стали и технологии производства при изготовлении тонкостенных электросварных труб и изделий из них. Литьё и металлургия. 2011. № 3 (51). С. 216–221.
2. Єршов С. В. Конспект лекцій з дисципліни «Вступ до спеціальності». Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2015. 92 с.
3. Рудской А. И., Лунев В. А. Теория и технология прокатного производства: учебное пособие. Москва: Наука. СПб: Наука, 2005, 540 с.
4. Гладченкова Ю. С. Управление структурой и свойствами проката из низкоуглеродистых и низколегированных сталей для получения изделий методами штамповки: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: 05.16.01. Москва, 2016. 147 с.
5. Гусева С. С., Гурено В. Д., Зварковский Ю. Д. Непрерывная термическая обработка автолистовой стали. Москва: Металлургия. 1979. 224 с.
6. Матюк В. Ф. Влияние технологии производства листового проката низкоуглеродистых качественных сталей на их структурное состояние и взаимосвязь между механическими и магнитными свойствами (обзор). Неразрушающий контроль и диагностика. 2011. № 1. С. 3–31.
7. Уваров В. В., Носова Е. А. Структура и свойства листовых сталей для холодной штамповки: учебное пособие / Под общ. ред. Ф. В. Гречникова. Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2003. 74 с.
3. Rudskoy A. I., Lunev V. A. (2005). Theory and technology of rolling production: uchebnoye posobiye. Moskva: Nauka. [In Russian].
4. Gladchenkova Yu. S. (2016) Control of the structure and properties of rolled products from low-carbon and low-alloy steels to obtain products by stamping methods [Upravleniye strukturoy i svoystvami prokata iz nizkouglerodistykh i nizkolegировannykh staley dlya polucheniya izdeliy metodami shtampovki]: author. dis. Cand. tech. Sciences: 05.16.01. Moscow [In Russian].
5. Guseva S. S., Gureno V. D., Zvarkovskiy Yu. D. (1979) Continuous heat treatment of auto sheet steel [Nepriyvnaya termicheskaya obrabotka avtolistovoy stali] Moskva: Metallurgiya [In Russian].
6. Matyuk V. F. (2011) Influence of technology for the production of sheet metal of low-carbon high-quality steels on their structural state and the relationship between mechanical and magnetic properties (review) [Vliyaniye tekhnologii proizvodstva listovogo prokata nizkouglerodistykh kachestvennykh staley na ikh strukturnoye sostoyaniye i vzaimosvyaz' mezhdu mekhanicheskimi i magnitnymi svoystvami (obzor)] Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika. 1. Pp. 3–31.
7. Uvarov V. V., Nosova E. A. (2003) The structure and properties of sheet steels for cold stamping: Textbook [Struktura i svoystva listovykh staley dlya kholodnoy shtampovki: Uchebnoye posobiye] Samara: Samar. gos. aerokosm. un-t [In Russian].

**Дошечкіна Ірина Василівна**, к.т.н., доцент, кафедра технології металів та матеріалознавства, тел. 095-162-22-50, e-mail: [divkhadi@ukr.net](mailto:divkhadi@ukr.net), Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, 61002, Україна.

### Повышение технологической пластичности при сохранении прочности холоднокатанной тонколистовой низкоуглеродистой стали

**Аннотация.** Исследована скоростная разупрочняющая обработка холоднокатаной тонколистовой стали 08кп с использованием контактного нагрева и охлаждения. Установлены оптимальные температурно-временные параметры процессов рекристаллизационного отжига и последующего перестаривания для предотвращения деформационного старения. Разработанная технология термической обработки обеспечивает комплекс свойств, которые соответствуют регламентированной документации потребителя для изготовления двухслойных свернутопаяных трубок малого диаметра, что эксплуатируются под большим давлением. Трубки, обработанные по рекомендуемой технологии, успешно прошли стопроцентный контроль в условиях производства.

**Ключевые слова:** тонкий лист, холоднокатаная сталь 08кп, скоростной контактный нагрев, рекристаллизационный отжиг, перестаривание, деформационное старение, структура, прочность, технологическая пластичность.

**Дощечкина Ирина Васильевна**, к.т.н., доцент кафедры технологии металлов и материаловедения, тел. 095-162-22-50, e-mail: divkhadi@ukr.net, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, ул. Ярослава Мудрого, 25, Харьков, 61002, Украина.

### **Increasing technological plasticity with preserving strength of cold-rolled thin-sheet low-carbon steel**

**Abstract.** At domestic metallurgical plants, the traditional method of softening low-sheet cold-rolled low-carbon steels is long recrystallization annealing of coils in cap furnaces, which has significant disadvantages: the process is very long and energy-consuming. According to the properties of annealed steel, it does not meet the requirements of the consumer for the manufacture of two-layer rolled brazed tubes. In this regard, the question of developing a new method of weakening heat treatment of cold-rolled sheet to improve the set of properties and the quality of the sheet surface is relevant in time and has unconditional practical significance with the prevention of its deformation aging. To achieve this goal the following tasks were solved: research and determination of optimal temperature-time parameters of high-speed contact recrystallization annealing and subsequent aging (which has no analogues) of thin tape blanks to

obtain a given set of performance properties and prevention of natural aging. The best mode of contact high-speed ( $100^{\circ}\text{C}/\text{c}$ ) recrystallization annealing is established, which provides cold-rolled sheet steel 08 kp with a set of properties that corresponds to GOST 9045-93 category VG, i.e. the ability of steel to cold complex deformation. However, further deformation aging of annealed steel at a speed of 08 kp leads to a sharp drop in ductility and increased strength. Developed a two-stage softening high-speed heat treatment consisting of recrystallization annealing and subsequent aging, increases both the strength and ductility of cold-rolled sheet, stabilizes the properties of steel to prevent its deformation aging. The obtained properties meet the regulated requirements of the consumer to the blanks intended for production of the two-layer rolled up soldered tubes operated in the conditions of the increased pressure. Tubes of small diameter, which were made of steel strips, processed by the recommended technology, have successfully passed 100 % defect-free quality control in the production environment.

**Key words:** thin sheet, cold-rolled steel 08kp, high-speed contact heating, recrystallization annealing, re-aging, strain aging, structure, strength, technological plasticity.

**Doshchekina I.**, PhD, Associate Professor, Department of Technology of Metals and Materials Science, tel. 095-162-22-50, e-mail: divkhadi@ukr.net, Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

---

---