

МЕТАЛЕВІ МАТЕРІАЛИ З ПІДВИЩЕНОЮ МІЦНІСТЮ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВАГОНІВ

Розглянуто питання по застосуванню низьколегованих сталей з підвищеною міцністю після різноманітних термомеханічних обробок для виготовлення залізничних вагонів.

Ключові слова: низьколеговані сталі, термомеханічна обробка, залізничний вагон

Рассмотрены вопросы по использованию низколегированных сталей с повышенной прочностью после различных термомеханических обработок для изготовления железнодорожных вагонов.

Ключевые слова: низколегированные стали, термомеханическая обработка, железнодорожный вагон

The issues of using the high-strength low-alloy steels after different thermomechanical treatments for manufacture of railway cars are considered.

Keywords: low-alloy steels, thermomechanical treatments, railway car

Розробляючи пропозиції щодо використання металевих матеріалів з підвищеним рівнем властивостей для будівництва вагонів, треба врахувати, що потрібне співвідношення між властивостями може бути досягнуте декількома шляхами [1]. Один з них – це використання спеціального легування при виготовленні сталей. Комплекс властивостей таких сталей, при практично незмінному структурному стані, залежить в основному від їх хімічного складу. Інший напрямок виготовлення металевих матеріалів з підвищеним рівнем міцності – це зміна структурного стану металу виробів при використанні різноманітних термічних та термомеханічних обробок. При такому підході, зміна дисперсності та морфології структурних складових дозволить досягти потрібного співвідношення між властивостями [2]. Рівень міцності після такої обробки в значній мірі зв'язаний із ступенем відхилення металу від термодинамічно стабільного стану. При зовнішніх впливах, таких як нагрів до різних температур, пластична деформація та ін. будуть обов'язково супроводжуватися розвитком структурних змін, які спрямовані на досягнення умов рівноваги. Обумовлено це тим, що сам процес зміцнення при термічній та термомеханічній обробці заснований на введенні додаткової кількості дефектів кристалічної будови, що підвищує термодинамічний потенціал системи, якою є сталь.

Неухильне зростання вартості легуючих елементів указує на перспективний напрямок підвищення міцнісних властивостей металевих виробів, який заснований на об'єднанні двох наведених підходів – це виготовлення економічно легованих сталей із подальшою їх термічною зміцнюючою обробкою [3, 4]. Відомо, що

введення до складу низьковуглецевих сталей невеликих добавок ніобію, ванадію, азоту, бору разом з традиційними легуючими хімічними елементами дозволяє, після прискореного охолодження, досягати рівня міцності 1000 МПа і більше [5]. З іншого боку, при виготовленні вагонів достатньо широко застосовуються технології зварювання, при яких розвиток процесів зниження міцності може мати достатньо вагоме значення, особливо в зоні термічного впливу зварного шву [6]. Додатково треба врахувати, що в елементах залізничного вагона, які піддаються циклічним навантаженням розвиток процесів структурних змін може негативно впливати на комплекс властивостей металу [7].

Використання сталей з підвищеним рівнем міцності дозволить не тільки знизити загальну масу вагона, але і сприяти підвищенню безпеки експлуатації [8].

Другим питанням, яке необхідно вирішити при виборі металевого матеріалу це особливості виготовлення конкретного елемента залізничного вагону. В першому наближенні, елементи вагонів можна розподілити на дві групи за технологією виготовлення: це елементи для яких використовують різноманітні вироби прокатного виробництва (лист, фасонні профілі та ін.) або ливарні технології.

Так, наприклад бокову раму візка або надресорну балку виготовляють з використанням сталі 20ГЛІ за ливарною технологією. При цьому її комплекс властивостей повинен відповідати вимогам: межа плинності (σ_T) 294...343 МПа, межа міцності (σ_B) 490 МПа, відносне подовження (δ) 20 %, відносне звуження (ψ) 30 %, ударна в'язкість при +20 °С (KCU^{+20}) ≥ 49 Дж/см², при

$-60\text{ }^{\circ}\text{C} \geq 24\text{ Дж/см}^2$. Інша марка сталі 20ГФЛ має хімічний склад аналогічний як для 20ГЛ (різниця лише в додатку ванадію 0,04...0,16 %) та і комплекс властивостей приблизно однаковий із сталлю 20ГЛ. На основі даних випробувань визначено, що для структурного стану металу після лиття добавки ванадію 0,04...0,16 % або титану в межах 0,005...0,03 %, до складу сталі 20ГЛ (20ГТЛ) приводять до підвищення міцності лише на 5 % (до 510 МПа), при цьому можна спостерігати зниження δ на 2 %. З іншого боку, використання термічної обробки, яка спрямована на зміну структурного стану металу, може сприяти підвищенню комплексу властивостей [5, 6]. Так, піддаючи нормалізації готовий виріб, наприклад бокову раму візка, нагріву до температури вище температури початку фазових перетворень (A_{c1}), після потрібної витримки при цій температурі для вирівнювання температур по перетину і подальшого охолодження на вільному повітрі, очікуються властивості: $\sigma_T = 340\text{...}350\text{ МПа}$, $\sigma_B = 650\text{...}660\text{ МПа}$, $\delta = 20\text{...}22\text{ \%}$, $\psi = 30\text{...}35\text{ \%}$. Порівняльний аналіз отриманих даних показує, що зміна структурного стану металу (за умови незмінності хімічного складу, наприклад, для сталі 20ГЛ) дозволить підвищити міцність на 30 %, при практично незмінних інших характеристиках. Аналогічний, якщо не більший, вплив на рівень міцності можна досягти і для сталей 20ГТЛ, 20ГФЛ. Якісно інше технологічне рішення – це вплив на процес охолодження металу після заповнення форми рідким металом. Зміна швидкості кристалізації дає змогу впливати на дисперсність структури і, як наслідок цього, керувати якістю виробу. Однак, як бокова рама візка, або надресорна балка являють собою достатньо складної форми виробу, то і розподіл внутрішніх напружень в них після виготовлення достатньо складний. Як свідчать експериментальні дані, зміна розподілу внутрішніх напружень, наприклад після ремонтних або відновлювальних робіт, може привести до достатньо швидкого зародження, в місцях підвищених діючих напружень при експлуатації, осередків руйнування. Перспективним напрямком по удосконаленню ливарних технологій є вплив на процеси формування зародків твердої фази та їх зростання при охолодженні [6, 8]. Так, введення спеціальних модифікаторів в рідкий метал дозволить не тільки підвищити гомогенність структури після закінчення кристалізації але і впливати на морфологію структурних складових металу, їх розподіл в матриці. Під-

тверджується наведений підхід відомими співвідношеннями стосовно введення в метал спеціальних сумішей, які давали змогу підвищити в 1,5...1,6 разу коефіцієнт запасу міцності при втомі. Упровадження наведених технічних рішень, за рахунок підвищення якості металу дозволить суттєво подовжити строк експлуатації наведених виробів ливарного виробництва.

Для виробів, які виготовляють за технологіями гарячої пластичної деформації, значно більше варіантів підвищення міцності. Так, катані колісні центри, які виготовляють із сталі 50 (вуглець 0,45...0,52 %) в гарячекатаному стані мають $\sigma_T = 290\text{ МПа}$, $\sigma_B = 590\text{ МПа}$, $\delta = 16\text{ \%}$, $\psi = 22\text{ \%}$, $KCU^{+20} 20\text{ Дж/см}^2$, $HB = 1650\text{...}2350\text{ МПа}$. Піддаючи нормалізації колісний катаний центр (нагрів до температури вище температури початку фазових перетворень (A_{c3}), необхідна витримка при цій температурі і подальше охолодження на вільному повітрі) очікується рівень властивостей: $\sigma_T = 375\text{ МПа}$, $\sigma_B = 630\text{ МПа}$, $\delta = 14\text{ \%}$, $\psi = 38\text{ \%}$, $HB = 2410\text{ МПа}$. Порівняльний аналіз показує, що зміна структурного стану металу (після нормалізації), при незмінному хімічному складі (сталь 50) дозволить підвищити міцність на 7 %. Піддаючи наведений метал поліпшенню (гартування від нормальних температур нагріву та послідовний відпуск) досягається подальше підвищення міцності: σ_T до 460 МПа, $\sigma_B = 700\text{...}850\text{ МПа}$, $\delta = 15\text{ \%}$, $\psi = 30\text{ \%}$, $HB = 3500\text{...}4000\text{ МПа}$. Порівняльний аналіз із комплексом властивостей гарячекатаного металу показує на можливість підвищення міцності на 30...40 %, при практично незмінній пластичності.

Для виготовлення кузова вагона достатньо широкого застосування отримали сталі типу 09Г2, 09ГС та ін. із вмістом вуглецю на рівні 0,08...0,1 %. В гарячекатаному стані наведені сталі мають властивості: $\sigma_T = 305\text{ МПа}$, $\sigma_B = 440\text{ МПа}$, $\delta = 21\text{ \%}$, $\psi = 35\text{...}39\text{ \%}$.

Інша марка сталі така, як 15Г2АФД, з вуглецем до 0,12 %, але з мікродобавками легуючих елементів, в гарячекатаному стані має декілька підвищений рівень міцнісних властивостей: $\sigma_T = 390\text{ МПа}$, $\sigma_B = 540\text{ МПа}$, з практично незмінною пластичністю ($\delta = 19\text{ \%}$, $\psi = 39\text{...}44\text{ \%}$). Аналогічною є сталь 10Г2ФБ із мікродомішками бору. При вмісті вуглецю 0,09 %, в гарячекатаному стані вона має такий комплекс властивостей: $\sigma_T = 550\text{ МПа}$, $\sigma_B = 640\text{ МПа}$, $\delta = 20,5\text{ \%}$, $\psi = 39\text{...}44\text{ \%}$.

Піддаючи ізотермічному розпаду при різних температурах, за рахунок диспергування фазових складових сталей досягається підвищення відповідних показників комплексу властивостей. Так, для температур розпаду 450, 500, 550 °С σ_T приймає відповідні значення 669, 627, 614 МПа; σ_B – 721, 684, 678 МПа, δ – 13, 16,6, 25,4 %. Якщо проводити оцінювання по межі плинності, то підвищення буде складати приблизно 20 %. Наведені приклади зміни комплексу властивостей низьковуглецевих економічнолегованих сплавів свідчать, що співвідношення між міцнісними та пластичними характеристиками може змінюватись в широкому діапазоні значень.

Розглядаючи конкретно елементи вагона, слід відзначити, що найбільш металомісткими слід вважати кузов і раму. Їх маса для сучасних вагонів, що знаходяться в експлуатації складає приблизно 50...60 % від загальної маси всього вагона. Використання сучасних конструкційних матеріалів дозволить змінити наведену долю металу. Так, окремі елементи – обшиву кришки люка напіввагона виготовляють зі сталі 10ХНДП, а гарячекатані профілі – із сталі 09Г2Д, з класом міцності на рівні 345 МПа.

Проведені дослідження показали можливість використання низьколегованих сталей з достатньою холодостійкістю для виготовлення хребтової балки із сталі 10Г2БД, двотавра № 19 і бокову обв'язку із сталі 08ХГСДП підвищеної корозійної стійкості.

Цілеспрямовані дослідження по використанню низьковуглецевих сталей для виготовлення крупногабаритних зварних конструкцій показали необхідність класифікації сталей за класом міцності. Так, для класу міцності 235...255 використовують сталі типу 10Г, 15Г з кількістю вуглецю до 0,22 %. Наступний клас міцності 345 може бути досягнутий з використанням вже низьколегованих сталей типу 10ХГ2СНД з кількістю вуглецю на рівні до 0,15 %, марганцю на межі до 1,8 %, кремнію – до 0,8 %, міді, хрому та нікелю – на рівні 0,3...0,6 %. Враховуючи, що основний вплив на рівень міцнісних характеристик сталей спостерігається з боку вуглецю, вже невеликі його добавки можуть суттєво сприяти зростанню класу міцності металу. Так, дійсно, збільшення вуглецю на 0,05 %, в межах марочного складу сталі 15Г2СД, дозволяє збільшити клас міцності приблизно на 10 % – до 375...390 МПа. Мікролеговуючі добавки ванадію або ніобію на рівні до 0,12...0,15 % дозволяють вже в гарячекатаному стані, через подрібнення аустенітного зе-

рна, підвищити характеристики міцності металу з одночасним зростанням опору зародженню тріщин. Добавки азоту також сприяють подальшому підвищенню класу міцності металу. Прикладом може бути сталь типу 15Г2АФС із приблизно 0,015...0,025 % азоту, що дає змогу перевести метал в більш високий клас міцності – 400...420. Подальше підвищення класу міцності стає можливим досягти завдяки підвищенню стійкості аустеніту при охолодженні за рахунок спеціального легування. Наведене зміна хімічного складу металу дозволяє в процесі його прискореного охолодження змінити структурний стан. Так, клас міцності на рівні 590 (сталь типу 10Г2ХСН2ФАМ) стало можливим досягти за рахунок розвитку процесів структурних перетворень частково за зсувним механізмом. Рівень міцності, який знаходиться в інтервалі значень 600...1 000 МПа, може бути досягнутим в аналогічній сталі з підвищеним вмістом хрому до 3 % та нікелю до 3...4 %. В наведених сталях (сталь 10Г2Х2Н3АФ) значна доля структури складається із мартенситу з визначеною кількістю аустенітної фази.

Таким чином, змінюючи у визначеному інтервалі значень концентрацію легуючих елементів в сталі та піддаючи в подальшому металевий прокат прискореному охолодженню, можна досягти достатньо високих рівнів міцності в порівнянні з гарячекатаними низьковуглецевими сталями, такими як, наприклад, сталі 09Г, 10Г, 15Г.

Аналіз нормативно-технічної документації країн СНД і Балтії стосовно розробки вагонів нового покоління показує, що зниження маси вагону з одночасним збільшенням несучої спроможності, може бути досягнуто за рахунок використання гарячекатаних профілів прокату з класом міцності 390...420 МПа, або навіть 450. Враховуючи, що зростання міцнісних характеристик прокату, в тому числі і того який піддають термічній обробці зміцненням, має підвищений рівень остаточних внутрішніх напружень, їх вплив на поведінку металу, особливо за умови циклічного навантаження, не завжди має однозначний характер. Таким чином, після виготовлення конструкції, треба урахувати розподіл внутрішніх напружень, їх знак порівнюючи з можливим рівнем напружень, які виникають в елементах конструкції під час її експлуатації.

Заслужують спеціальної уваги питання по використанню металевих матеріалів з підвищеним рівнем опору зношуванню при експлуатації. Одними з таких матеріалів можуть бути ча-

вуни, в яких, за рахунок виділення карбїду ванадію при визначених температурних умовах із пересичених ванадієм евтектичних карбїдів, досягається збільшення пластичних властивостей. В результаті наведеного карбїдного перетворення евтектична сітка карбїдів руйнується. Сформована структура з рівномірним розташуванням карбїдів в металевій матриці дозволяє в чавуні досягти рівня властивостей більшості складно легованих високоміцних сталей, виготовлених за достатню складними технологіями.

На підставі детального аналізу зміни комплексу властивостей сталей від вмісту легуючих елементів та структурного стану (гарячекатаний метал або термічно зміцнений на різні рівні) стає необхідним визначити пріоритетні напрямки використання прокату з конкретним рівнем міцнісних, пластичних властивостей, опором зародженню тріщин різної природи походження. Заслуговує уваги використання профілів прокату, які дозволять підвищити жорсткість конструкцій, в тому числі гнуті профілі прокату. Використання таких профілів замість катаних, може дати змогу знизити металомісткість вагонів без зниження жорсткості конструкції в цілому.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Вакуленко, И. А. Морфология структуры и деформационное упрочнение стали [Текст] / И. А. Вакуленко, В. И. Большаков. – Д., 2008. – 196 с.

2. Бабич, В. К. Деформационное старение стали [Текст] / В. К. Бабич, Ю. П. Гуль, И. Е. Долженков. – М.: Металлургия, 1972. – 320 с.
3. Вакуленко, И. А. Использование термического упрочнения элементов железнодорожных колес с целью повышения эксплуатационной надежности [Текст] / И. А. Вакуленко, О. Н. Перков // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 24. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2008. – С. 195-196.
4. К вопросу надежности и долговечности железнодорожных колес [Текст] / О. Н. Перков [и др.] // Зб. наук пр. Нац. гірн. ун-ту «Теория и практика металлургии». – Д., 2008. – № 3. – С. 43-46.
5. Федин, В. М. Металлопродукция для железнодорожного транспорта: повышение эффективности [Текст] / В. М. Федин, А. И. Борщ, И. В. Шарапова // Ж.-д. трансп. – 2005. – № 6. – С. 45-49.
6. Конюхов, А. Д. Грузовому вагостроению – современные конструкционные материалы [Текст] / А. Д. Конюхов // Ж.-д. трансп. – 2001. – № 11. – С. 60-63.
7. Залежність структурних змін в металі залізничної вісі від схеми навантаження [Текст] / І. О. Вакуленко [та ін.] / Заліз. трансп. України. – 2010. – № 1. – С. 3-4.
8. Сапожников, С. А. Новые материалы и технологии [Текст] / С. А. Сапожников // Ж.-д. трансп. – 2008. – № 4. – С. 65-68.

Надійшла до редколегії 24.01.2011.

Прийнята до друку 27.01.2011.