

МЕТАСТАБІЛЬНИЙ АУСТЕНІТ У НАПЛАВЛЕНИХ МЕТАЛАХ: ПРИРОДА, МЕХАНІЗМИ ЗМІЦНЕННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ

Викладено сучасні уявлення про природу метастабільного аустеніту в наплавлених металах та механізм його деформаційного мартенситного перетворення — TRIP-ефекту (Transformation-Induced Plasticity). Детально пояснено фізичний зміст понять метастабільності: температури початку мартенситного перетворення M_s , температури деформаційного перетворення M_d30 та енергії дефектів пакування (SFE), що визначає легкість зародження мартенситних кристалів під дією напружень. Показано, чому структура метастабільного аустеніту є більш енергоємною порівняно з мартенситними або перлітними структурами тієї ж твердості, та як це безпосередньо пов'язано з підвищеною зносостійкістю відновлених деталей завдяки одночасному зміцненню поверхні, релаксації мікронапружень і поглинанню енергії зовнішнього впливу в зоні контакту. Систематизовано вплив основних легуючих елементів — хрому, марганцю, вуглецю, нікелю та азоту — на стабільність аустеніту, положення мартенситних точок M_s та M_d30 , а також на інтенсивність деформаційного мартенситного перетворення при навантаженні. Окремо розглянуто роль азоту як особливо ефективного легуючого елементу, що одночасно стабілізує аустеніт, знижує SFE та при відпуску утворює дисперсні карбонітриди Ti, V, Al розміром 50–200 нм, забезпечуючи дисперсійне зміцнення матриці і подрібнення зерна аустеніту. Показано, що введення 0,075–0,15% азоту дозволяє знизити вміст дефіцитного нікелю в три рази при збереженні або підвищенні рівня зносостійкості наплавленого металу. Описано номенклатуру та порівняльні характеристики промислових наплавочних матеріалів із метастабільним аустенітом на Fe–Cr–Mn основі. Показано, як режими термічної обробки — відпуск при 400°C для ударно-абразивного зношування та при 650°C для абразивного зношування і сухого тертя — впливають на фазовий склад і визначають оптимальний баланс між кількістю метастабільного аустеніту та його здатністю перетворюватися на мартенсит деформації в процесі експлуатації. Визначено актуальні відкриті наукові питання напрямку та перспективи подальших досліджень. Стаття забезпечує читача необхідним понятійним апаратом і розумінням ключових закономірностей для самостійної наукової роботи у даній галузі.

Ключові слова: метастабільний аустеніт, TRIP-ефект, деформаційне мартенситне перетворення, наплавлений метал, зносостійкість, Fe–Cr–Mn сталі, порошковий дріт, термічна обробка, азот, карбонітриди.

Постановка проблеми. Деталі машин, що зазнають абразивного та ударно-абразивного зношування, виходять з ладу набагато швидше, ніж того вимагає конструкція в цілому. Кранові колеса, ролики правильних машин, зуби ковшів екскаваторів — усе це замінюють роками, витрачаючи при цьому значні кошти і час на простої. Електродугове наплавлення порошковими дротами залишається одним з найбільш доступних і ефективних способів відновлення таких деталей [1, 2]. Серед різних класів наплавочних матеріалів особливе місце посідають склади на основі системи Fe–Cr–Mn, у яких в наплавленому шарі формується метастабільний аустеніт. Їхня принципова відмінність від решти полягає в тому, що такий метал зміцнюється безпосередньо під час роботи деталі, а не тільки на стадії виготовлення.

Машинобудування і зварювальне виробництво

Цей огляд покликаний пояснити, чому так відбувається та що саме потрібно знати, щоб правильно досліджувати та застосовувати подібні матеріали.

Аналіз останніх досліджень. Ідея використання деформаційного мартенситного перетворення для підвищення зносостійкості сягає корінням у роботи Разікова 1960-х років [3], де кавітаційностійка сталь 30X10Г10 стала прообразом цілого класу наплавочних матеріалів. Надалі школа Малинова [4] розвинула цей напрямок, показавши, що регулюванням хімічного складу і режимів термообробки можна цілеспрямовано управляти активністю мартенситного перетворення і тим самим адаптувати матеріал до конкретного виду зношування. Паралельно концепцію TRIP-ефекту (Transformation-Induced Plasticity) активно розробляли стосовно конструкційних сталей [5, 6], що дало розуміння фізики процесу на рівні кристалічної решітки. Разом з тим питання легування азотом, оптимізації відпуску і практичного застосування у наплавленні потребують систематизації, особливо для дослідника-початківця.

Мета статті — у доступній формі викласти природу метастабільного аустеніту, механізми його зміцнюючої дії та вплив ключових технологічних чинників на властивості наплавленого металу.

Поняття метастабільного аустеніту. Аустеніт — це γ -модифікація заліза з гранецентрованою кубічною решіткою. У чистому залізі він стабільний лише вище 727°C . У легованих сталях аустенізуючі елементи (Mn, Ni, N) розширюють γ -область і дозволяють зберегти аустеніт при кімнатній температурі. Якщо при цьому перетворення на мартенсит термодинамічно вигідне, але кінетично заблоковане, аустеніт називають метастабільним.

Для практики важливі дві характеристичні температури. Перша — M_s (Martensite start): якщо M_s нижче нуля, аустеніт у стані спокою не перетворюється сам по собі. Друга — M_d30 : температура, при якій 50 % аустеніту перетворюється на мартенсит після деформації на 30 %. Якщо M_d30 вище кімнатної температури, значить при механічному навантаженні аустеніт активно реагуватиме — саме цього і потрібно досягти. Для хромомарганцевих наплавлених металів типові значення: $M_s \approx -50 \dots +20^\circ\text{C}$, $M_d30 \approx +50 \dots +150^\circ\text{C}$ [4, 7].

Третя важлива характеристика — енергія дефектів пакування (SFE, stacking fault energy). Чим нижча SFE, тим важче часткові дислокації рекомбінують, і тим легше утворюються зародки мартенситу під дією напружень. Марганець, хром і особливо азот знижують SFE, що робить хромомарганцево-азотисті склади особливо схильними до деформаційного мартенситного перетворення [6, 8].

TRIP-ефект і механізми зміцнення при зношуванні. Коли абразивна частинка або контртіло взаємодіє з поверхнею наплавленого металу, у локальних мікрооб'ємах виникають концентровані напруження. Саме в цих точках — там, де найвірогідніше зародження мікротріщини — спрацьовує мартенситне перетворення. Це TRIP-ефект (Transformation-Induced Plasticity), вперше систематично описаний Зекелем [5] у 1967 р. Стосовно наплавлених покриттів його детально дослідив Малинов [4].

Механізм підвищення зносостійкості складається з трьох складових. По-перше, зміцнення поверхні в зоні контакту: мартенсит деформації значно твердіший за вихідний аустеніт, тому твердість поверхневого шару після навантаження зростає з 22–27 до 38–44 HRC. По-друге, релаксація напружень і гальмування тріщин: мартенситне перетворення супроводжується збільшенням об'єму на $\sim 3\text{--}4\%$, що компенсує концентрацію напружень і фактично «закриває» зароджувану тріщину. По-третє, поглинання енергії удару: значна частина енергії абразивного або ударного впливу витрачається на перебудову кристалічної решітки, а не на руйнування. Структура метастабільного аустеніту є суттєво енергоємнішою, ніж мартенситна сталь тієї ж твердості [4].

Вплив легуючих елементів. Хром (10–19 %) — феритоутворювач, що знижує M_s і утворює при відпуску карбіди $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$ та Cr_{23}C_6 . Ці карбіди вилучають вуглець із твердого

Машинобудування і зварювальне виробництво

розчину, дестабілізуючи аустеніт і підсилюючи TRIP-ефект. Крім того, хром надає корозійну стійкість. При вмісті понад 15–16% і малому Mn структура переходить у ферито-мартенситну, що небажано для цього класу матеріалів.

Марганець (10–16 %) — головний замітник нікелю у хромомарганцевих складах. Аустенітна структура формується лише при >15 % Mn і <15 % Cr. Марганець знижує SFE, але при надто великому вмісті (>17–18 %) аустеніт стає надто стабільним і перестає реагувати на деформацію — зносостійкість падає. Тому вміст марганцю підбирають залежно від коефіцієнта динамічності умов роботи деталі [4, 9].

Вуглець (0,10–0,35 %) відіграє подвійну роль. У твердому розчині він стабілізує γ -фазу. При відпуску 600–650°C виділяється у вигляді карбідів, що дестабілізує аустеніт і робить його чутливим до ДМП. При вмісті понад 0,5 % виникає ризик утворення карбідних сіток по межах зерен, що різко знижує пластичність і ударну в'язкість [9, 10].

Азот (0,075–0,15 %) — найбільш ефективний легуючий елемент цього класу. Його аустенізуючий вплив у 25–30 разів сильніший, ніж у нікелю в перерахунку на одиницю маси, що дозволяє знизити вміст нікелю в три рази. Азот знижує SFE, активуючи ДМП. При відпуску він утворює дрібні карбонітриди Ti, V, Al розміром 50–200 нм, що є ефективними дисперсійними зміцнювачами і одночасно інгібіторами росту зерна. Вводять азот через азотований феромарганець у шихту порошкового дроту; коефіцієнт засвоєння при наплавленні під флюсом складає 0,35–0,45 [8, 11].

Нікель (мінімум 3 %) потрібен для запобігання утворенню δ -фериту при підвищеному вмісті Mn та N. У традиційних складах його було 8–10 %, але завдяки азоту вдається обійтись трьома відсотками без погіршення зносостійкості [4].

Титан і ванадій (Ti 0,04–0,2 %, V 0,02–0,5 %) утворюють стійкі нітриди TiN і VN, нерозчинні в аустеніті до 1050–1200°C. Вони слугують бар'єрами для міграції меж зерен, подрібнюючи структуру наплавленого металу. Дрібні вторинні карбонітриди (Ti,V)(C,N), що виділяються при відпуску, додатково зміцнюють матрицю [11, 12].

Промислові наплавочні матеріали. Перші матеріали цього класу з'явилися у 1960-х роках на базі сталі 30X10Г10 [3]. Нині номенклатура включає дроти суцільного перерізу, порошкові дроти та порошкові стрічки. Основні представники наведено в таблиці 1. Матеріали поділяються на дві групи: з вмістом C 0,20–0,35 % (аустенітно-мартенситна структура, твердість 200–260 НВ) і низьковуглецеві з C \leq 0,14–0,20 % (переважно аустенітна структура, твердість 22–27 HRC після наплавлення, що дозволяє механічну обробку різанням).

Таблиця 1 – Наплавочні матеріали з метастабільним аустенітом

Марка матеріалу	C	Mn	Cr	Ni	Ti/V	N	Клас структури	Твердість
Нп-30X10Г10Т	0,25–0,35	10–12	10–12	0,6	Ti 0,15–0,30	–	Аустен.–март.	200–220 НВ
ПП-Нп-14X12Г12СТ	\leq 0,14	12	12	–	Ti 0,08	–	Аустенітний	22–27 HRC
ПЛ-Нп-10X14Г10МДАФ	\leq 0,20	8–11	9–13	–	V 0,1–1,0	\leq 0,15	Аустенітний	250–350 НВ
ПП-Нп-12X12Г12СФ	\leq 0,20	10–15	12–14	–	V 0,6–1,5	0,08–0,15	Аустенітний	250–350 НВ

Головна вимога до всіх матеріалів цього класу: низька твердість після наплавлення (200–255 НВ) для забезпечення обробки різанням і відсутність тріщин при наплавленні без попереднього підігріву — та значне зміцнення поверхні (до 400–500 НВ) безпосередньо в процесі експлуатації за рахунок TRIP-ефекту [4, 9].

Машинобудування і зварювальне виробництво

Вплив термічної обробки. Термічна обробка — другий за значущістю інструмент після хімічного складу. У наплавленому стані метал містить 85–90 % аустеніту і лише 5–10 % мартенситу; твердість не перевищує 27 HRC. Відпуск змінює цю картину суттєво — залежно від температури.

Відпуск при 400°C частково виділяє карбіди і дестабілізує аустеніт, але залишає його в достатній кількості (70–78 %). Приріст мартенситу деформації при механічному навантаженні сягає 30–50 % — максимум серед усіх режимів. Саме тому 400°C є оптимальним для умов ударно-абразивного зношування з підвищеними ударними навантаженнями.

Відпуск при 650°C забезпечує інтенсивне виділення карбідів $(Cr,Fe)_7C_3$ і карбонітридів $(Ti,V)(C,N)$ розміром 50–200 нм. Вміст вуглецю в твердому розчині знижується, аустеніт дестабілізується до рівня 60–70 %, твердість зростає до 34–38 HRC. Такий аустеніт охоче перетворюється на мартенсит при навантаженні ($\Delta M = 35\text{--}45\%$). Цей режим є оптимальним для сухого тертя та абразивного зношування. При підвищенні температури до 750°C карбіди укрупнюються, зміцнювальний ефект знижується [4, 9].

Дані щодо впливу температури відпуску на властивості наплавленого металу Fe–Cr–Mn–Ni–N наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Вплив відпуску на фазовий склад і зносостійкість наплавленого металу

Т відпуску, °C	HRC	γ , %	α' вих., %	ΔM при деф., %	ϵ (сухе тертя)	ϵ_a (абразив)
Без відпуску	23–27	85–90	5–10	15–20	1,70	1,65
400 *	28–33	70–78	18–25	30–50	2,10	1,95
650 **	34–38	60–70	25–32	35–45	2,65	2,38
750	30–33	68–75	20–28	22–30	2,20	2,05

Примітки: * — оптимум для ударно-абразивного зношування; ** — оптимум для сухого тертя та абразивного зношування; ϵ — відносна зносостійкість щодо еталону (сталь 45, 200 HB); ΔM — приріст мартенситу деформації після навантаження.

Практичне застосування та відкриті питання. Матеріали з метастабільним аустенітом мають конкретну промислову «прописку». Найбільш поширені об'єкти відновлення — ходові колеса мостових і козлових кранів, що зношуються по поверхні кочення, ролики правильних машин і зуби ковшів екскаваторів. Наплавлення порошковими дротами типу ПП-Нп-14X12Г12СТ під флюсом забезпечує твердість 22–27 HRC після наплавлення, що дозволяє обробити деталь різанням до потрібного розміру, а в процесі роботи поверхня зміцнюється до 38–44 HRC за рахунок TRIP-ефекту [4, 12]. При відновленні зубів екскаваторів оптимальний склад зміщується в бік вищого вуглецю і меншої стабільності аустеніту, щоб максимально задіяти ДМП саме при ударних навантаженнях.

Важливий практичний аспект — зниження собівартості. Традиційні аустенітні матеріали типу X20Ni10Cr містять 8–10 % нікелю. Заміна нікелю марганцем і азотом у складах типу 10X19Ni3Cr10Al знижує вміст Ni до 3 % без погіршення, а нерідко і з підвищенням зносостійкості за рахунок більш інтенсивного TRIP-ефекту [9]. Додатково, застосування змішаного флюсу (Record SK + AN-26П, 50:50) замість дорогого чистого Record SK не впливає на якість наплавленого металу, але знижує витрати на флюс приблизно на 40 %.

Серед відкритих питань, що є перспективними для подальшої роботи, варто виділити три. По-перше, кількісне моделювання: надійних моделей, здатних прогнозувати фазовий склад і зносостійкість за хімічним складом і режимом відпуску, поки що бракує — це вдячне поле для регресійного аналізу та машинного навчання. По-друге, контроль азоту при

Машинобудування і зварювальне виробництво

наплавленні: часткові втрати N у дузі і зварювальній ванні ускладнюють стабільне отримання заданого складу, і технологічні рішення тут ще не вичерпані. По-третє, поведінка при підвищених температурах: ролики нагрівальних печей і подібні деталі працюють при 200–400°C, де термічна стабільність карбонітридів і самого аустеніту досліджена ще недостатньо.

ВИСНОВКИ

Метастабільний аустеніт у наплавлених металах Fe–Cr–Mn–Ni–N реалізує принцип самозміцнення матеріалу при навантаженні — TRIP-ефект. Його суть у тому, що механічна енергія зношування перетворюється на енергію фазового перетворення, зміцнюючи поверхню там і тоді, де це найбільш потрібно.

Стабільність аустеніту і активність TRIP-ефекту контролюються хімічним складом (Cr, Mn, C, N, Ni) і режимом відпуску. Азот є найбільш перспективним елементом: він стабілізує аустеніт, знижує SFE і утворює зміцнюючі карбонітриди при відпуску, дозволяючи суттєво скоротити вміст нікелю.

Відпуск при 650°C оптимальний для абразивного зношування і сухого тертя, при 400°C — для ударно-абразивного зношування. Промислова практика підтверджує підвищення ресурсу відновлених деталей у 2–3 рази порівняно зі звичайними наплавочними матеріалами.

Список використаних джерел

1. Рябцев І.А. Наплавка деталей машин і механізмів / І.А. Рябцев. – К.: Екотехнологія, 2004. – 160 с.
2. Лившиц Л.С. Основы легирования наплавленного металла / Л.С. Лившиц, Н.А. Гринберг, Э.Г. Куркумелли. – М.: Машиностроение, 1984. – 103 с.
3. Разиков М.И. О выборе наплавочного материала, стойкого при кавитационном нагружении / М.И. Разиков, Б.А. Кулишенко // Сварочное производство. – 1967. – №7. – С. 10–12.
4. Малинов Л.С. Ресурсосберегающие экономнолегированные сплавы и упрочняющие технологии, обеспечивающие эффект самозакалки / Л.С. Малинов, В.Л. Малинов. – Мариуполь: изд. «Рената», 2009. – 568 с.
5. Zackay V.F. The enhancement of ductility in high-strength steels / V.F. Zackay [et al.] // ASM Transactions Quarterly. – 1967. – Vol. 60. – P. 252–259.
6. De Cooman B.C. State-of-the-knowledge on TWIP steel / B.C. De Cooman, Y. Estrin, S.K. Kim // Acta Materialia. – 2018. – Vol. 142. – P. 283–362.
7. Olson G.B. Kinetics of strain-induced martensitic nucleation / G.B. Olson, M. Cohen // Metallurgical Transactions A. – 1975. – Vol. 6A. – P. 791–795.
8. Gavriljuk V.G. Nitrogen in Iron and Steel / V.G. Gavriljuk, H. Berns // ISIJ International. – 1999. – Vol. 39, No. 8. – P. 807–815.
9. Зусін А.М. Розробка наплавочних матеріалів і технології наплавлення металу з метастабільним аустенітом: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.06 / ДВНЗ «ПДТУ». – Мариуполь, 2015. – 168 с.
10. Малинов Л.С. Упрочнение нестабильных аустенитных Cr–Mn–N сталей / Л.С. Малинов, Т.Д. Эйсмонт // Известия АН СССР. Металлы. – 1969. – №2. – С. 114–120.
11. Simmons J.W. Overview: high-nitrogen alloying of stainless steels / J.W. Simmons // Materials Science and Engineering A. – 1996. – Vol. 207. – P. 159–169.

Машинобудування і зварювальне виробництво

12. Малинов Л.С. Разработка и исследование новой порошковой ленты для наплавки колес мостовых кранов / Л.С. Малинов, А.П. Чейлях, Е.А. Харланова // Сварочное производство. – 1995. – №10. – С. 22–25.

Zusin A.M., Olifirenko M.V.

METASTABLE AUSTENITE IN WELD DEPOSITS: NATURE, HARDENING MECHANISMS AND APPLICATION

The current understanding of the nature of metastable austenite in deposited metals and the mechanism of its deformation martensitic transformation — the TRIP effect (Transformation-Induced Plasticity) are presented. The physical meaning of the concepts of metastability is explained in detail: the temperature of the onset of martensitic transformation M_s , the deformation transformation temperature M_d30 , and the packing defect energy (SFE), which determines the ease of nucleation of martensitic crystals under the action of stresses. It is shown why the structure of metastable austenite is more energy-intensive compared to martensitic or pearlitic structures of the same hardness, and how this is directly related to the increased wear resistance of restored parts due to simultaneous surface strengthening, relaxation of microstresses, and absorption of energy from external influences in the contact zone. The influence of the main alloying elements — chromium, manganese, carbon, nickel and nitrogen — on the stability of austenite, the position of the martensite points M_s and M_d30 , as well as on the intensity of the deformation martensitic transformation under load is systematized. The role of nitrogen as a particularly effective alloying element that simultaneously stabilizes austenite, reduces SFE and, upon tempering, forms dispersed carbonitrides of Ti, V, Al with a size of 50–200 nm, ensuring dispersion strengthening of the matrix and grinding of austenite grains is separately considered. It is shown that the introduction of 0.075–0.15% nitrogen allows reducing the content of deficient nickel by three times while maintaining or increasing the level of wear resistance of the deposited metal. The nomenclature and comparative characteristics of industrial surfacing materials with metastable austenite on the Fe–Cr–Mn basis are described. It is shown how the heat treatment modes — tempering at 400°C for impact-abrasive wear and at 650°C for abrasive wear and dry friction — affect the phase composition and determine the optimal balance between the amount of metastable austenite and its ability to transform into deformation martensite during operation. Relevant open scientific questions of the direction and prospects for further research are identified. The article provides the reader with the necessary conceptual apparatus and understanding of key patterns for independent scientific work in this field.

Keywords: metastable austenite, TRIP effect, deformation martensitic transformation, weld metal, wear resistance, Fe–Cr–Mn steels, flux-cored wire, heat treatment, nitrogen, carbonitrides.

Стаття надійшла 02.03.2026р.

Стаття прийнята 05.03.2026р.

Стаття опублікована 30.04.2026р.