

УДК 621.791.92

ЭФФЕКТ КИНЕТИЧЕСКОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ ПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКЕ ЭКОНОМНО ЛЕГИРОВАННЫХ ТЕПЛОСТОЙКИХ СПЛАВОВ*

Н.Н. Малушин, А.П. Ковалев, Д.А. Романов, В.Е. Громов, Р.А. Гизатулин

E-mail: da_rom@live.ru

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

Аннотация. Для упрочнения деталей машин горно-металлургического комплекса, работающих в условиях абразивного износа, широко применяются в качестве наплавочных материалов хромовольфрамовые теплостойкие стали типа Р18, Р6М5, Р9, Р2М8, 3Х2В8, 3Х2В4Ф, Х10В14, 25Х5ФМС и др. В настоящее время экономически и технически целесообразно осуществлять защиту поверхностей ответственных деталей машин и механизмов с использованием упрочняющих покрытий. Наиболее перспективным методом среди других является наплавка покрытий. В наплавленном металле типа экономно легированного сплава Р2М9 наблюдается эффект кинетической пластичности при мартенситном превращении. Концепция «экономного легирования» сплавов основана на выборе легирующих элементов, которые имели бы относительно небольшую стоимость и (или) входили бы в состав наиболее доступных лигатур. При шихтовке таких сплавов часто используются доступные «естественные лигатуры», например ферротитан и феррованадий. Сплавы также могут быть легированы микродобавками редкоземельных материалов. При мартенситном превращении определяющая роль в релаксации напряжений принадлежит эффекту кинетической пластичности. Влияние эффекта кинетической пластичности на характер формирования временных и остаточных напряжений изучено при охлаждении образцов из наплавленного металла типа сплава Р2М9 и стали 12Х17 на установке тепловой микроскопии ИМАШ-20-75. Проявление эффекта кинетической пластичности оценивали по снижению временных напряжений в процессе охлаждения жестко закрепленных образцов в интервале температур мартенситного превращения. Эффект кинетической пластичности можно использовать для регулирования напряженного состояния и предотвращения образования холодных трещин в наплавленных теплостойкими сталями высокой твердости деталях горно-металлургического оборудования.

Ключевые слова: наплавленный металл, экономно легированный сплав Р2М9, эффект кинетической пластичности, сверхпластичность, релаксация напряжений, установка тепловой микроскопии.

THE EFFECT OF KINETIC PLASTICITY AND ITS APPLICATION IN PLASMA SURFACING OF ECONOMICALLY ALLOYED HEAT-RESISTANT ALLOYS

N.N. Malushin, A.P. Kovalev, D.A. Romanov, V.E. Gromov, R.A. Gizatulin

E-mail: da_rom@live.ru

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Abstract. To strengthen the parts of machines of the mining and metallurgical complex operating under abrasive wear conditions, chromium-tungsten heat-resistant steels of the R18, R6M5, R9, P2M8, 3X2V8, 3X2V4F, Kh10V14, 25Kh5FMS types, etc. are widely used as surfacing materials. Currently, it is economically and technically feasible protect the surfaces of parts of critical machines and mechanisms and use hardening coatings. The most promising method among others is the surfacing of coatings. This article shows that in the deposited metal of the type of economically alloyed P2M9 alloy, the effect of kinetic plasticity is

*Исследования выполнены при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – докторов наук МД-486.2020.8 и кандидатов наук МК-5585.2021.4, а также при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00044.

observed during martensitic transformation. The concept of "economical alloying" of alloys is based on the choice of such alloying elements that would have a relatively low cost and / or would be included in the most affordable master alloys. Fulfillment of these conditions allows to reduce the cost of the production process and, accordingly, to reduce the cost of semi-finished products and finished products without significant loss in mechanical and operational properties. When blending such alloys, available "natural alloys" are often used, such as ferrotitanium and ferrovanadium. The advantages of economically alloyed alloys should also include ample opportunities for the use of scrap and production waste in smelting. Alloys can also be alloyed with microadditives of rare earth materials. However, the main disadvantages of this group of alloys are the insufficient level and instability of properties, as a result of which they are currently recommended for use mainly in terrestrial objects: medical implants, car parts and various decorative items. The effect of kinetic plasticity during martensitic transformation plays a decisive role in stress relaxation. The influence of the effect of kinetic plasticity on the nature of the formation of temporary and residual stresses during cooling of specimens of deposited metal of the P2M9 alloy and steel 12Kh17 on a thermal microscopy unit IMASH – 20–75 has been investigated. The manifestation of the effect of kinetic plasticity was assessed by the decrease in temporary stresses during the cooling of rigidly fixed samples in the temperature range of martensitic transformation. It is shown that the effect of kinetic plasticity can be used to regulate the stress state and prevent the formation of cold cracks in parts of mining and metallurgical equipment deposited with heat-resistant steels of high hardness.

Keywords: deposited metal, economically alloyed P2M9 alloy, effect of kinetic plasticity, superplasticity, stress relaxation, thermal microscopy unit.

Введение

Для упрочнения деталей машин горно-металлургического комплекса, работающих в условиях абразивного износа, широко применяются в качестве наплавочных материалов хромовольфрамовые теплостойкие стали типа P18, P6M5, P9, P2M8, 3X2B8, 3X2B4Ф, X10B14, 25X5ФМС и др. В разработанных в Сибирском государственном индустриальном университете способах наплавки теплостойких сталей высокой твердости для предотвращения образования холодных трещин, возникающих при использовании традиционной технологии наплавки, предложено применять эффект кинетической пластичности («сверхпластичности») при $\gamma \rightarrow \alpha$ -мартенситном превращении [1]. Эффект увеличения пластичности в теплостойких сталях при температурах на 50 – 80 °С ниже температуры A_1 впервые обнаружен и исследован А.П. Гуляевым [2]. Исследованиям эффекта повышенной пластичности посвящен ряд научных работ [3 – 7]. Однако данные об эффекте сверхпластичности при мартенситном $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращении в экономно легированном теплостойком наплавленном металле представлены в недостаточном объеме. Также не разработаны практические пути использования этого явления.

Целью настоящей работы является исследование эффекта кинетической пластичности (сверхпластичности) в наплавленном металле типа экономно легированных сталей P6M5, P2M8, P2M9 в процессе мартенситного превращения, доказательства возможности использования этого явления для уменьшения уровня остаточных напряжений в наплавленном металле, определение вероятности образования холодных трещин в процессе плазменной наплавки в среде азота.

Материалы и методы исследования

В работе проведено исследование кинетической пластичности наплавленных экономно легированных теплостойких сталей высокой твердости типа P2M9, дополнительно легированной алюминием и азотом. Химический состав стали P2M9: 0,86 % C; 4,80 % Cr; 2,50 % W; 9,40 % Mo; 0,50 % V; 0,85 % Al; 0,08 % N; остальное – железо. Химический состав хромистой коррозионно-стойкой стали 12X17, относящейся к ферритному классу: 0,10 % C; 17,50 % Cr; 0,70 % Mn; 0,65 % Si; остальное – железо.

Исследование влияния эффекта кинетической пластичности на характер формирования временных и остаточных напряжений при охлаждении образцов из наплавленного металла типа сплава P2M9 и стали 12X17 в кованом состоянии проводили на установке тепловой микроскопии ИМАШ-20-75 [8]. Сталь P2M9 мартенситного класса используется в качестве наплавочного материала для упрочнения наплавленных деталей. Сталь 12X17 относится к аустенитному классу, мартенситное превращение отсутствует. В настоящей работе показано, что только при протекании мартенситного превращения наблюдается эффект сверхпластичности.

Проявление эффекта кинетической пластичности оценивали по снижению временных напряжений в процессе охлаждения жестко закрепленных образцов в интервале мартенситного превращения. Закрепление осуществляли с помощью электромеханического привода установки. Образцы нагревали в вакууме 10^{-5} мм рт. ст. за счет тепла, выделенного при протекании электрического тока. Нагрев проводили до 800 °С, (что ниже точки A_{c1}) и до 1200 °С (при этой темпе-

ратуре наблюдается высокая степень растворения карбидной фазы в аустените). После нагрева и выдержки образцы жестко закрепляли для сохранения постоянства их длины при последующем охлаждении. Условия нагрева и охлаждения имитировали термический цикл плазменной наплавки. Неизменность длины обуславливала соответствующий рост упругопластической деформации образца при охлаждении. Напряжения в образцах в процессе охлаждения непрерывно измеряли с помощью тензометрических датчиков с точностью $\pm 1,5\%$. Температуру определяли платино-платинородиевой термопарой, приваренной к средней части образца. Временные напряжения в жестко закрепленных образцах в зависимости от температуры фиксировали на потенциометре типа ПДП-4.

В процессе испытаний замеряли расстояние между реперными точками, нанесенными на микротвердометре ПМТ-3, через 0,25 мм на базе 10 мм холодного образца до и после нагрева и перед началом мартенситного превращения. Погрешность измерения удлинения в рабочей зоне составляла не более $\pm 0,01$ мм. Замеры осуществляли с помощью высокотемпературного микроскопа МВТ-71. При охлаждении образцы растягивали по различным схемам. В первом случае напряжения, возникающие при температурном укорочении образца при охлаждении, компенсировали с помощью электромеханического привода установки. Получаемая при этом величина относительного удлинения характеризует лишь увеличение объема, которым сопровождается мартенситное превращение. Во втором случае в интервале мартенситного превращения проводили периодическое растяжение образца вплоть до его разрушения.

Результаты и их обсуждение

При охлаждении образцов из стали Р2М9 от температуры 1200 °С наблюдается эффект кинетической пластичности при фазовом превращении (рис. 1), который проявляется в снижении временных напряжений в интервале мартенситных температур 300 – 100 °С. Максимум напряжений на кривой формирования временных напряжений в стали составляет примерно 240 МПа и наблюдается при значении температуры, близкой к температуре начала мартенситного превращения сплава Р2М9 при ее закалке с температуры $T_n = 1200$ °С. Минимум напряжений наблюдается при 100 °С и соответствует температурам M_k^{ysl} , лежащим выше температуры конца мартенситного превращения M_k ($M_k^{ysl} > M_k$), когда степень превращения уже достаточно велика, и за счет образования прочного «каркаса»

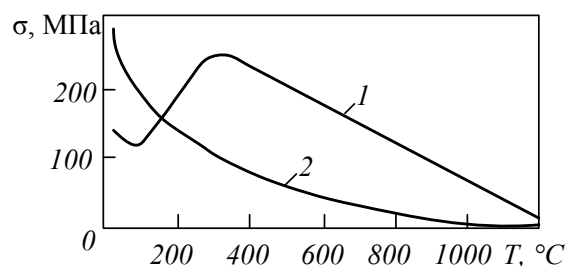


Рис. 1. Временные напряжения в образцах из напавленного металла типа стали Р2М9 (1) и стали 12Х17 (2)

из многочисленных мартенситных кристаллов возрастает предел текучести, а пластичность сплава начинает уменьшаться. Соответствие температур максимальных и минимальных значений временных напряжений температурам точек M_n и M_k^{ysl} подтверждается методами измерения удельного электросопротивления, dilatометрического анализа и литературными данными.

В интервале мартенситного превращения временные напряжения снижаются в полтора – два раза по сравнению с величиной напряжений, накопившихся при охлаждении в аустенитной области (рис. 1, кривая 1). При дальнейшем охлаждении ниже температуры M_k^{ysl} напряжения возрастают до 120 – 180 МПа за счет некоторого увеличения количества мартенсита. При охлаждении образцов из стали 12Х17 (рис. 1, кривая 2) ввиду отсутствия фазового превращения эффект кинетической пластичности не проявляется. С повышением температуры напряжения непрерывно увеличиваются и достигают значений, значительно превышающих остаточные напряжения в сплаве Р2М9, претерпевшем мартенситное превращение.

В настоящей работе определена роль эффекта сверхпластичности в релаксации временных напряжений. Для этого проводили определение относительного удлинения δ , характеризующего пластичность металла. Известно [1, 2], что для этих сталей определение характеристик пластичности (и в частности δ) не проводилось. Если гипотеза об определяющей роли сверхпластичного состояния в релаксации временных напряжений достоверна, то при дополнительном растяжении образца в момент мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения можно достичь значительной величины относительного удлинения.

Повышенные характеристики пластичности свидетельствуют о сверхпластичном состоянии. Относительное удлинение, получаемое в первом случае за счет увеличения объема, составляет в инструментальных сталях 3 – 5 %, что довольно

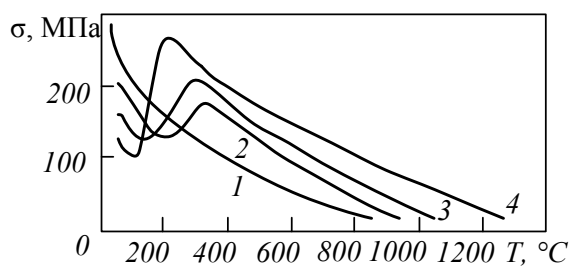


Рис. 2. Временные напряжения в жестко закрепленных образцах наплавленного сплава Р2М9 в зависимости от температуры нагрева при разных значениях T_n : 1 – 800 °C; 2 – 1000 °C; 3 – 1100 °C; 4 – 1200 °C

точно согласуется с данными об объемном эффекте мартенситного превращения для соединений железа. Растяжение образцов в интервале мартенситного превращения позволяет получить большие значения относительного удлинения (15 – 35 %). Такие значения пластичности свидетельствуют об определяющей роли кинетической пластичности (сверхпластичности) в релаксации временных напряжений в теплостойком наплавленном металле.

На рис. 2 представлены данные о влиянии степени легирования твердого раствора на релаксацию временных напряжений. Видно, что при охлаждении образцов от температур, превышающих точку A_{c1} , наблюдается эффект сверхпластичности при фазовом превращении. Этот эффект проявляется в снижении временных напряжений в интервале температур 310 – 100 °C. Максимум напряжений соответствует температурам 330, 310 и 230 °C (на кривых 2, 3 и 4). Эти значения температур довольно близки к температурам начала мартенситного превращения при выбранных температурах нагрева, а минимум напряжений проявляется при 210, 150 и 120 °C – соответствует температурам M_k^{ysl} , лежащим выше температуры конца мартенситного превращения M_k ($M_k^{ysl} > M_k$). Величина временных термических и структурных напряжений до начала мартенситного превращения зависит от температуры нагрева образца и возрастает с ее увеличением. При этом с повышением температуры нагрева максимум и минимум временных напряжений на кривой смещаются в область более низких температур, что следует связать с обогащением аустенита углеродом и легирующими элементами, которые приводят к снижению температур начала и конца мартенситного превращения [2]. Величина релаксации временных напряжений в интервале мартенситного превращения также зависит от температуры нагрева и возрастает с ее увеличением.

Исследования влияния эффекта кинетической пластичности на величину остаточных напряжений в образцах из сплава Р2М9 показали, что

величина остаточных напряжений зависит от температур мартенситного превращения и соответственно связана с кинетикой процесса. По-видимому, оказывают влияние морфологический тип и общее количество образующихся кристаллов мартенсита. При этом уровень остаточных напряжений зависит от величины интервала температура окончания релаксации временных напряжений M_k^{ysl} – комнатная температура T_k . Чем меньше интервал $M_k^{ysl} - T_k$, тем меньшую величину имеют остаточные напряжения при комнатной температуре. При увеличении T_n от 800 до 1200 °C температура окончания релаксации напряжений M_k^{ysl} понизилась от 210 до 120 °C, а величина остаточных напряжений при этом уменьшилась от 200 – 210 до 120 – 130 МПа (рис. 2, кривые 2, 3 и 4).

Таким образом, за счет смещения мартенситного интервала и проявления эффекта кинетической пластичности прямая связь величины остаточных напряжений с температурой нагрева стали нарушается. При нагреве образцов из стали Р18 до 800 °C ввиду отсутствия фазового превращения при охлаждении эффект кинетической пластичности не проявляется. В этом случае с понижением температуры напряжения непрерывно увеличиваются и достигают значений, в 2,0 – 2,5 раза превышающих остаточные напряжения в стали, претерпевшей мартенситное превращение (рис. 2, кривые 1 и 4). Эффект кинетической пластичности проявляется только в условиях развития фазового превращения. Так, в стали 12Х17 увеличение пластичности при охлаждении с различных температур не наблюдается.

Релаксацию напряжений можно использовать для регулирования напряженного состояния в процессе наплавки и предотвращения образования холодных трещин в наплавленном теплостойком металле. Так, в способе многослойной наплавки в азотсодержащей среде теплостойкими сталями высокой твердости проводят предварительный подогрев до температуры выше температуры начала мартенситного превращения на 50 – 100 °C ($T_{под} = 230 \div 280$ °C) наплавляемой заготовки. После наплавки каждого слоя осуществляют выдержку с одновременным снижением температуры подогрева наплавляемой заготовки на 20 – 100 °C ниже температуры начала мартенситного превращения, а непосредственно после наплавки последнего слоя проводят высокотемпературный отпуск на наплавочной установке с температурой, находящейся в интервале «температура рекристаллизации основного металла» – «температура отпуска наплавленного металла». Это позволяет получить наплавленный металл в закаленном состоянии с низким уровнем остаточных напряжений и

максимально использовать свойства наплавленного высоколегированного слоя [9].

Данные, полученные при исследованиях на установках тепловой микроскопии, проверяли путем наплавки по разработанным способам заготовок деталей диам. 100 мм порошковыми проволоками, обеспечивающими получение наплавленного металла типа стали Р2М9 дополнительно легированной азотом, алюминием и никелем. Наплавку заготовки осуществляли на установке для плазменной наплавки тел вращения УД – 417 [10].

Промышленные испытания в реальных заводских условиях показали, что изготовленные с применением плазменной наплавки активного слоя теплостойкими сталями высокой твердости с регулируемым термическим циклом наплавленные детали обладают повышенной (в 1,5 – 2,0 раза) стойкостью по сравнению с серийными деталями [1, 7].

Выводы

В наплавленном экономно легированном теплостойком металле наблюдается эффект повышенной пластичности в момент мартенситного превращения, который можно использовать для релаксации напряжений в процессе наплавки и предотвращения образования холодных трещин. Определяющая роль в релаксации временных напряжений в теплостойком металле принадлежит эффекту кинетической пластичности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Малушин Н.Н., Валуев Д.В. Обеспечение качества деталей металлургического оборудования на всех этапах их жизненного цикла путем применения плазменной наплавки теплостойкими сталями. – Томск: изд. Томского политехнического университета, 2013. – 358 с.
2. Гуляев А.П., Сармянова Л.М. Технологическая пластичность быстрорежущих сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. 1969. № 7. С. 2 – 9.
3. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. – М.: Металлургия, 1975. – 584 с.
4. Кайбышев О.А. Пластичность и сверхпластичность металлов. – М.: Металлургия, 1995. – 280 с.
5. Сверхпластичность металлических материалов / Под ред. М.Х. Шоршорова. – М.: Наука, 1993. – 220 с.
6. Применение эффекта сверхпластичности сталей в инструментальном производстве / С.Ф. Гнусов и др. – Томск: изд. НТЛ, 2008. – 237 с.
7. Малушин Н.Н. Технология изготовления прокатных валков плазменной наплавкой теплостойкими сталями высокой твердости. – В кн.: Влияние высокоэнергетических воздействий на структуру и свойства конструкционных материалов. Серия «Фундаментальные проблемы современного материаловедения». В 2-х т. Т. 2 / Под ред. В.Е. Громова. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2013. С. 290 – 297.
8. Малушин Н.Н. Методика исследований и образец из наплавленного металла для испытаний на установках тепловой микроскопии // Вестник СибГИУ. 2013. № 1 (3). С. 6 – 7.
9. Пат. РФ № 2699488. Способ многослойной наплавки теплостойкими сталями высокой твердости в азотсодержащей среде / Н.Н. Малушин., Д.А. Романов, В.Л. Осетковский, А.П. Ковалев, Е.А. Будовских, Д.В. Валуев. Заявл. 29.02.2019, опубл. 05.09.2019. Бюл. № 25.
10. Малушин Н.Н., Гизатулин Р.А., Ковалев А.П., Осетковский В.Л., Осетковский И.В. Влияние высокотемпературного отпуска на свойства хромовольфрамового металла высокой твердости, наплавленного плазменной наплавкой в защитно-легирующей среде азота/ Заготовительные производства в машиностроении. 2017. № 12. С. 30 – 40.

© 2021 г. Н.Н. Малушин, А.П. Ковалев,
Д.А. Романов, В.Е. Громов, Р.А. Гизатулин
Поступила 4 марта 2021 г.