

Помагуайи Кевин Чукимарка^{1*}, Даниил Вадимович Пырин¹, Константин Олегович Иванов¹, Кристина Сергеевна Елтышева¹, Аркадий Юрьевич Жилияков^{1,2}, Сергей Владимирович Беликов^{1,2}

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация

²Институт физики металлов им. М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация

*f.pomagualli@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА СВАРКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СПЛАВА HASTELLOY G-35

В данной работе сварное соединение из сплава G35 было исследовано в трех областях: зона сплавления (ЗС), зона термического влияния (ЗТВ) и основной металл (ОМ). Для понимания возможных фазовых превращений при сварке была построена изотермическая диаграмма. Интерметаллидные соединения σ -фазы присутствуют как в ЗС, так и в ЗТВ. Твердость ЗС и ОМ одинакова, в то время как для ЗТВ она увеличивается. Результаты калориметрии показывают тепловые эффекты при температурах до 650°C. Для каждой зоны (ЗС, ЗТВ, ОМ) трансформация начинается при разных температурах, однако поведение кривых для трех зон описывает одну и ту же реакцию.

Ключевые слова: Сплав Ni-Cr-Mo, коррозионностойкий сплав, изотермическая диаграмма, сварное соединение, твердость, дифференциальный термический анализ (ДТА), удельная теплоемкость

Pomagualli Kevin Chuquimarca, Daniil V. Pyrin, Konstantin O. Ivanov, Kristina. S. Eltysheva, Arkadiy Y. Zhilyakov, Sergey V. Belikov

THE INFLUENCE OF THE WELDING PROCESS ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE HASTELLOY G-35 ALLOY

In this work, the welded joint made of G35 alloy was studied in three areas: the fusion zone (FZ), the heat affected zone (HAZ) and the base metal (OM). An isothermal diagram was constructed to understand the possible phase transformations during welding. The intermetallic compounds of the σ -phase are present in both FZ and HAZ. The hardness of FZ and BM is the same, while for HAZ it increases. The calorimetry results show thermal effects at temperatures up to 650°C, for each zone (ЗС, ЗТВ, ОМ) the transformation begins at different temperatures, however, the behavior of the curves for the three zones describes the same reaction.

Keywords: Ni-Cr-Mo alloy, corrosion-resistant alloy, isothermal diagram, welded joint, hardness, differential thermal analysis (DTA), specific heat

В текущем исследовании основное внимание при сварке Hastelloy G-35 уделяется, главным образом, оценке влияния процесса сварки на микроструктурные изменения, твердость и удельную теплоемкость сварных соединений. Предыдущие исследования показали стойкость к коррозии в течение 100 часов. В работе [1] была изучена коррозионная стойкость материала, с акцентом на развитие локальной коррозии, межкристаллитной коррозии. Исследования были сосредоточены на структурных изменениях сплава Hastelloy G-35 под воздействием расплавленных солей [1].

После процесса сварки вдоль стыка могут образовываться различные структуры (дендриты, частично перекристаллизовавшиеся зерна, карбиды и т. д.), которые могут влиять на физические и механические свойства материала. Одной из проблем при создании конструкций из таких сплавов является локализация коррозионных повреждений вблизи сварных соединений или непосредственно в сварных швах. Поэтому вопрос о структуре и фазообразовании при сварке сплавов никель-хром-молибден является важным.

Процедура сварки MIG (Metal Inert Gas Welding) проводилась при соблюдении следующих параметров: сварка за один проход с током – 150 А, скоростью – 160 мм/мин и расходом газа (Ar) – 10 л/мин. Присадочным материалом являлся ENiCrMo – 22 (таблица 1), так как он является аналогичным по химическому составу для сплава G35.

В таблице 1 представлен химический состав сплава G-35 в соответствии со стандартами UNS N060355/ASTM B619, и химический состав электродной проволоки ENiCrMo – 22.

Испытания проводились на сварном соединении трубы Hastelloy G-35 и показали, что металл перед сваркой представлен равноосными зёрнами аустенита, сформированными в процессе операции горячей прокатки.

Таблица 1

Химический состав Hastelloy G-35 и наполнителя ENiCrMo – 22
соответствует стандартам ASTM B619, AWS A5.11

В соответствии со стандартом:	Содержание элементов, мас. %							
	Ni	Cr	Mo	Fe	Si	Mn	Al	C
UNS N06035, ASTM B619	BAL	33	8	2*	0.6*	0.5*	0.4*	0.05*
UNS W86022, AWS A5.11	BAL	32...34	7.6...9	2*	0.6*	0.5*	0.4*	0.05*

* Максимум

На рис. 1 показано, что при кратковременном нагреве в диапазоне температур 800...900 °С начинаются процессы выделения нежелательных фаз. Которые могут негативно повлиять на коррозионную стойкость материала из-за обеднения границ зерен по Cr и Mo. Эти результаты подтверждаются их обнаружением в ЗС и ЗТВ (рис. 3). Основной металл характеризуется наличием зерен аустенита, и отсутствием вторичных фаз. В ЗТВ при большом

увеличении было зарегистрировано присутствие ярких частиц. В предыдущих работах, посвященных сплавам Hastelloy [2], эти яркие частицы были определены как σ -фаза. Значительное присутствие этих мелких частиц регистрируется в зоне термического влияния (в которой зафиксировано наибольшее количество σ -фазы).

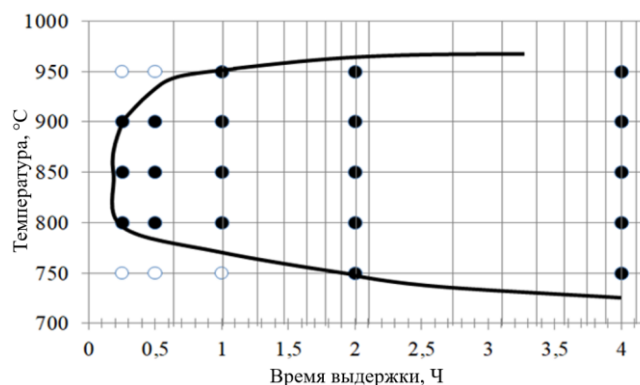


Рис. 1 Изотермическая диаграмма выделения вторичных фаз в сплаве G35 в процессе изотермической выдержки

В ЗТВ и ОМ наблюдаются равноосные зерна (рис. 2). Исследование микроструктуры в областях ЗС и ЗТВ (рис. 3) при большом увеличении, показали наличие округлых частиц вторичной фазы. Выделение частиц σ -фазы присутствует в зоне сплавления (в междендритном пространстве) и зоне термического воздействия (вдоль границ зерен).

Морфология структуры сварного шва, по-видимому, повторяет направление отвода тепла во время охлаждения сварного шва и имеет дендритную столбчатую структуру, аналогичный рост дендритов описан другими авторами [3-5].

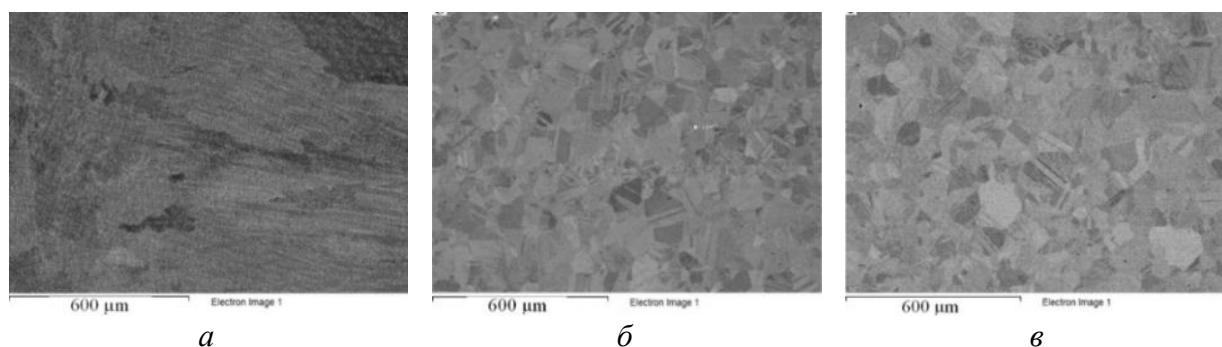


Рис. 2 Области микроструктуры, характерные для сварного соединения: а - ЗС, б - ЗТВ, в - ОМ

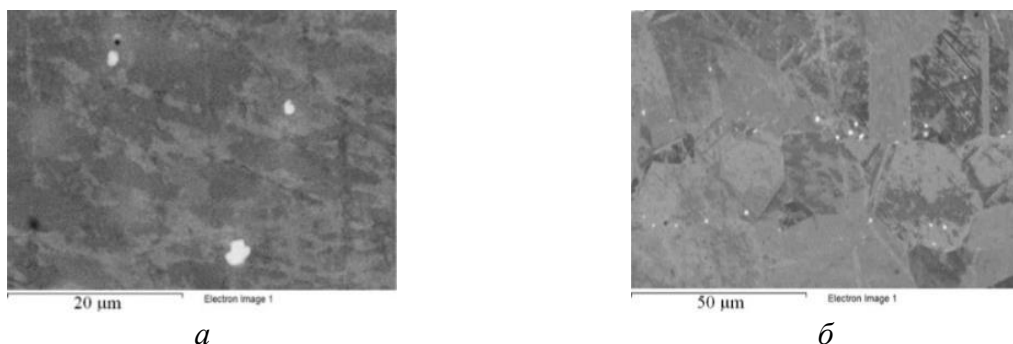


Рис. 3 Микроструктура областей ЗС (а) и ЗТВ (б) при большом увеличении, демонстрирующая присутствие частиц второй фазы

На рис. 4 показано, что ЗТВ характеризуется высокими значениями твердости, в то время как для ЗС и ОМ представлены аналогичные значения. Профиль твердости сварного соединения показывает увеличение ЗТВ (231 ± 4 HV), что связано с высоким уровнем напряжений в этой области, в то время как в зоне ОМ и ЗС были обнаружены аналогичные значения 207 ± 2 HV и 210 ± 7 HV соответственно.

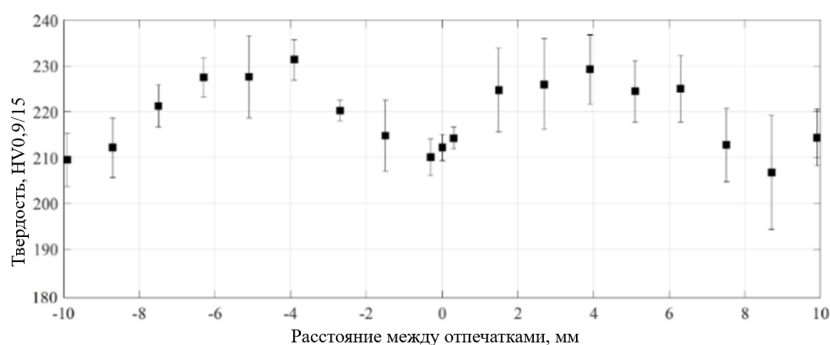


Рис. 4. Распределение твердости по Виккерсу сварного шва вдоль сварного соединения.

На рис. 5 показано изменение теплоемкости образцов сплава, взятых из характерных областей сварного соединения. В диапазоне температур $250 \dots 500^\circ\text{C}$ наблюдается эффект (отмечен пунктирными линиями) снижения кривой перед достижением первой точки перегиба при 400°C , что более выражено для образцов основного металла. Далее происходит снижение теплоемкости с повышением температуры, за которым следует ее повышение (отмечено стрелками). Для образцов ОМ превращение начинается при более низкой температуре, 510°C , в то время как начальная температура для образцов ЗТВ и ЗС выше, 571 и 574°C соответственно. Несмотря на разницу температур в начале превращения, в образцах, взятых из разных областей сварного соединения, увеличение теплоемкости прекращается при температуре около 650°C .

В случае основного металла, где химические элементы расположены более равномерно, возможно образование большего количества частиц фазы (фаза близкого порядка), в результате чего эффект более выражен (отклонение черной кривой от пунктирной линии) (Рис. 5). В случае химически

неоднородного материала в зоне плавления, из-за обогащения междендритных пространств Cr и Mo, эффект ниже из-за меньшего количества областей возможного образования этой фазы. Дальнейшее снижение кривых теплоемкости после предыдущего воздействия связано с увеличением количества образующихся частиц, что более заметно для зоны плавления. После точек перегиба, обозначенных стрелками, ранее образовавшиеся частицы переупорядоченной фазы (ближний порядок).

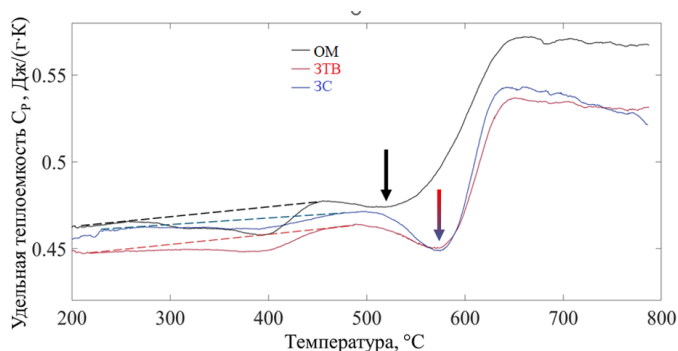


Рис. 5. Зависимость теплоемкости сплава G35 от температуры

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ramu, A.; Pavlik, V.; Silnikova, V.; Boca, M. Corrosion Behavior of Incoloy®800H, Hastelloy®G35® and 316L Stainless Steel in the Molten Eutectic Fluoride Mixture FLiNaK and Its Vapors. *Materials* 2023, 16, 2679. <https://doi.org/10.3390/ma16072679>
2. Tawancy, H.M. Long-term ageing characteristics of Hastelloy alloy X. *J Mater Sci* 18, 2976–2986 (1983). <https://doi.org/10.1007/BF00700780>
3. S.A., D. and J.M. Vitek, Correlation between solidification parameters and weld microstructures. *International Materials Reviews*, 1989. 34(5): p. 213-245. DOI:10.1179/imr.1989.34.1.213
4. Schönmaier, H., Krein, R., Schmitz-Niederau, M., & Schnitzer, R. (2021). Influence of the heat input on the dendritic solidification structure and the mechanical properties of 2.25 Cr-1Mo-0.25 V submerged-arc weld metal. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(10), 7138-7151. DOI:10.1007/s11665-021-05922-x
5. Chirieleison G.M., Hoback G.L., Crook P. et al. The welding characteristics of a new Ni-Cr-Mo alloy designed to resist wet process phosphoric acid // *Welding Journal* (Miami, Fla). - 2008. - V.87, No.5. - P.119-123. https://www.semanticscholar.org/paper/The-Welding-Characteristics-of-a-New-Ni-Cr-Mo-Alloy-Chirieleison-Hoback/47c950f9cbeb059334968c44c5feb050c3bcc6c4?utm_source=direct_link