

УДК 621.791:539.3:536.2

Моделирование формирования изделий из жаропрочных никелевых сплавов методом дуговой наплавки

Котельников Алексей Владимирович

Kotelial9816@gmail.com

Ольшанская Татьяна Васильевна

tvo66@rambler.ru

SPIN-код: 1556-9351

ПНИПУ, Пермь, Россия

Аннотация. Разработана методика моделирования формирования изделий из жаропрочных никелевых сплавов в программном обеспечении COMSOL Multiphysics. Получена универсальная конечно-элементная модель, позволяющая прогнозировать температурные поля, напряжения и деформации с оценкой влияния технологических параметров наплавки на формирование напряженно-деформированного состояния.

Ключевые слова: дуговая наплавка, численное моделирование, температурные поля, температурные напряжения, метод конечных элементов, никелевые жаропрочные сплавы, COMSOL Multiphysics

Введение. Жаропрочные никелевые сплавы относят к трудно свариваемым сплавам, что связано со специфическим сочетанием теплофизических и механических свойств и их изменениями в процессе сварочного термомеханического цикла [1]. Наиболее критичными для никелевых сплавов являются три температурных интервала хрупкости (ТИХ): ТИХ₁ — при температуре выше 1200 °С образуются ликвационные трещины, ТИХ₂ — в диапазоне от 650 до 1100 °С образуются подсолидусные трещины, ТИХ₃ — при нагреве ранее наплавленных слоев выше температур старения [2]. Наиболее перспективный путь решения — разработка моделей и критериев, связывающих параметры режима наплавки с локальными показателями напряженно-деформированного состояния и запасом технологической прочности [3].

Методы и материалы; результаты. Процесс наплавки моделировался в COMSOL Multiphysics с учетом послойного нанесения и последовательной активации материала [4], неактивным слоям присваиваются низкие теплофизические и механические свойства. Температурозависимые характеристики никелевых сплавов рассчитывались в JMatPro.

Для моделирования теплового воздействия использована модель теплового источника Голдака [5], в которой распределение тепла описывается двойным эллипсоидом.

Моделировались несколько стратегий движения источника тепла: с поперечным колебанием, с круговой осцилляцией и колебания под углом 45° к оси наплавленного слоя. Квазистационарный температурный режим образуется спустя 6–8 слоев в зависимости от стратегии наложения валиков. Наиболее благоприятной стратегией наплавки, с точки зрения предупреждения горячих трещин, является движение источника тепла с круговой осцилляцией. При

такой стратегии обеспечивается более медленная скорость охлаждения с отсутствием (или минимальным) времени пребывания наплавленных слоев в ТИХ дисперсионного твердения. Экспериментальные данные также подтверждают отсутствие образования трещин при круговой осцилляции.

Результаты моделирования показывают, что в процессе дуговой наплавки возникают три зоны с пластическими деформациями — в местах контакта наплавленных слоев с подложкой, и в последних двух–трех валиках. В данных зонах возникают остаточные напряжения, превышающие 90 % от предела текучести ($\sigma_{\text{экв}} \geq 0,9\sigma_T$).

Заключение. Получена численная модель процесса формирования изделий из жаропрочных никелевых сплавов методом дуговой наплавки. Данная модель позволяет спрогнозировать температурные поля, остаточные напряжения и деформации с последующей оценкой влияния ключевых технологических параметров наплавки на формирование напряженно-деформированного состояния. Основные выводы:

- квазистационарный температурный режим устанавливается через 6–8 слоев;
- минимальная вероятность образования горячих трещин обеспечивается при круговой осцилляции источника тепла;
- в процессе дуговой наплавки возникают три зоны с выраженными пластическими деформациями.

Список источников

- [1] Волченко В.Н., ред. *Сварка и свариваемые материалы: справочник. Т. 1. Свариваемость материалов.* Москва, Металлургия, 1991, 528 с.
- [2] Макаров Э.Л., Якушин Б.Ф. *Теория свариваемости сталей и сплавов.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 487 с.
- [3] Mohd Ghazali S.N., Ibrahim M.H.I., Manurung Y.H.P., Adenan M.S., Abd Rahman A.R., Ramlan A.R., Harati E., Busari Y.O. A focused review on numerical computation in wire arc additive manufacturing for high strength low alloy steels: past insights and potential opportunities. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2025, vol. 141, pp. 2679–2708. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-16817-9>
- [4] Kostin V.A., Grigorenko G.M. Modeling of Temperature Fields, Stresses, and Strains in Cylindrical Shells Produced by Additive Manufacturing. *Automatic Welding*, 2019, vol. 7, pp. 16–23. <https://doi.org/10.15407/as2019.07.03>
- [5] Goldak J., Bibby M., Moore J., House R., Patel B. Computer Modeling of Heat Flow in Welds. *Metallurgical Transactions B*, 1986, vol. 17 (3), pp. 587–600. <https://doi.org/10.1007/BF02670226>