

УДК 669:661

Взаимосвязь структуры и механических характеристик жаропрочных никелевых сплавов с технологическими параметрами производства заготовок дисков, получаемых методом металлургии гранул («as-HIP»)

Гарибов Генрих Саркисович¹

Карашаев Мухамед Муаедович^{2,3}

mkarashaev16@mail.ru

Лавриненко Владислав Юрьевич²

Карягин Дмитрий Андреевич⁴

Востриков Алексей Владимирович³

¹ ОАО «ВИЛС», Москва, Россия

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

³ НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, Москва, Россия

⁴ АО «СМК», Ступино, Россия

Аннотация. Представлены основные закономерности современного производства заготовок дисков из порошков-гранул жаропрочных никелевых сплавов с применением метода металлургии гранул («as-HIP»). Показаны результаты работ, отражающие взаимосвязь структуры и механических характеристик жаропрочных никелевых сплавов с их технологическими параметрами производства с применением технологии горячего изостатического прессования.

Ключевые слова: металлургия гранул, жаропрочные никелевые сплавы, горячее изостатическое прессование, метод PREP, закалка, старение

Relationship between the structure and mechanical characteristics of heat-resistant nickel alloys and the technological parameters of disk blanks produced by pellet (granule) metallurgy («as-HIP»)

Garibov Genrikh Sarkisovich¹

Karashaev Mukhamed Muaedovich^{2,3}

mkarashaev16@mail.ru

Lavrinenko Vladislav Yurievich²

Karyagin Dmitry Andreevich⁴

Vostrikov Alexey Vladimirovich³

¹ JLS “VILS”, Moscow, Russia

² BMSTU, Moscow, Russia

³ SRC “Kurchatov institute” — VIAM, Moscow, Russia

⁴ JSC “SMK”, Stupino, Russia

Abstract. The main patterns of modern production of disk blanks from powder granules of heat-resistant lower-forest alloys by using the method of granule metallurgy are presented at this report (“as-HIP”). The results of the research reflecting the relationship between

the structure and mechanical characteristics of heat-resistant nickel alloys with their technological production parameters using hot isostatic pressing technology are shown.

Keywords: pellet (granule) metallurgy, heat-resistant nickel alloys, hot isostatic pressing, PREP method, quenching, ageing

Одной из основных задач металлургии на современном этапе развития страны является разработка и внедрение новых высокоэффективных технологических процессов, обеспечивающих получение материалов со специальными характеристиками.

Одним из основных элементов технологии производства полуфабрикатов, например турбинных и компрессорных дисков авиационных двигателей, является процесс консолидации гранулированного материала в изделия заданной конфигурации и обеспечение в этих изделиях высоких прочностных и пластических характеристик материала.

Так как создать высокие скорости охлаждения в большом объеме расплава практически нерешаемая задача, то в самом начале развития технологии металлургии гранул возникла идея охлаждать малые порции полностью легированного сплава, т. е. получать микрослитки (гранулы), а затем их консолидировать в плотный компакт.

В свою очередь, повышение скорости охлаждения в процессе кристаллизации при практически неизменных коэффициентах дендритной ликвации легирующих элементов приводит к диспергированию структурных составляющих, таких как ветви дендритов. Таким образом, можно существенно уменьшить химическую неоднородность по объему металла.

В ходе работ по исследованию гранул было установлено, что «гранулы, полученные методом плазменного распыления быстровращающейся заготовки, имеют дендритную структуру с соответствующей дендритной ликвацией и с усадкой, сосредоточенной, в основном, на поверхности гранул в виде микропористости дендритного характера» [1]. На основе этого утверждения для получения гранул в промышленном объеме был выбран метод плазменного распыления быстровращающейся заготовки.

Наиболее важным выводом, определившим направление в разработке параметров горячего изостатического прессования (ГИП) и термической обработки, а также в корректировке состава и легировании гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов, можно считать следующий: «гранулы сложнолегированных жаропрочных никелевых сплавов являются метастабильными системами, в которых при нагреве происходит распад твердого раствора, что создает предпосылки для выделения карбидов по границам гранул и обуславливает необходимость регламентирования и корректирования химического состава сплавов для предотвращения образования карбидных сеток по границам гранул, а также требует разработки специальных режимов ГИП (компактирования) и термической обработки» [2].

Исходя из этого, основной структурной особенностью гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов, которую необходимо было устранить —

проявление наследственных границ гранул, вызванное образованием карбидных сеток по границам гранул, формирующихся в начальный период выдержки в процессе горячего изостатического прессования (ГИП) и препятствующих взаимному прорастанию зерен.

Введение в состав сплава сильного карбидообразующего элемента гафния, который образует на стадии расплава стабильные карбиды с низкой растворимостью в никелевых сплавах, позволило предотвратить распад первичных карбидов на стадии ГИП и сформировать зеренную структуру без следов наследственных границ гранул [3].

Основной технологической операцией, определяющей структуру, и комплекс механических свойств конечных заготовок дисков из гранул является процесс ГИП, цель которого обеспечение консолидации гранул с исчезновением наследственных границ с одновременной проработкой и устранением литой структуры гранул. Достижение этих целей в процессе ГИП позволяет после наложения соответствующей термической обработки получать монолитное изделие с требуемыми структурными и механическими характеристиками без применения дополнительной операции пластической деформации [4].

В результате широкого комплекса проведенных исследований по влиянию режимов ГИП на структуру компактированного материала было установлено, что формирование в сплаве полностью рекристаллизованной структуры зависит от температуры ГИП и размера используемых гранул. Чем крупнее гранулы, тем больше должно быть превышение температуры ГИП над температурой полного растворения γ' -фазы ($T_{\gamma'}$) [5]. При температурах ГИП ниже $T_{\gamma'}$ в компактированном материале сохраняются остатки литой нерекристаллизованной структуры, что приводит к формированию разнотекстурности и, как следствие, к нестабильности механических свойств и снижению длительной прочности.

Следовательно, для получения мелкого рекристаллизованного зерна (~ 25 мкм), обеспечивающего высокие прочностные характеристики, необходимо использование гранул размером менее 100 мкм, а при проведении операции ГИП температуру необходимо устанавливать ближе к $T_{\gamma'}$ настолько, насколько это позволяет точность поддержания и измерения температуры.

Для получения более крупного зерна, необходимого для обеспечения высокой длительной прочности, желательно использовать более крупные гранулы, а температуру при проведении операции ГИП задавать более высокую, насколько это позволяет температура солидуса сплава.

Для создания технологии горячего изостатического прессования заготовок дисков и валов из гранулжаропрочных никелевых сплавов важно понимать влияние основных параметров процесса (температура нагрева засыпки гранул, удельного усилия прессования, длительности выдержки под давлением) на уплотняемость гранул, а также критерии выбора рациональных параметров процесса. При ГИП, в процессе уплотнения засыпки гранул участвуют два основных механизма закрытия межгранульной пористости —

микропластическая деформация гранул и их спекание. Величина и характер микропластической деформации зависят от уровня рабочих давлений и температуры прессования. Повышение же плотности за счет спекания лимитируется в основном температурой и длительностью ее воздействия [6].

Одним из ключевых этапов технологии, определяющим структуру и механические характеристики заготовок дисков из жаропрочных никелевых сплавов является их термическая обработка [7–9]. Типичный режим термической обработки турбинных заготовок дисков из гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов включает обработку на γ -твердый раствор, закалочное охлаждение и последующее ступенчатое старение.

Основной вклад в формирование конечной структуры материала вносит температурно-временной режим процесса термической обработки, так как именно он определяет размер и объемную долю частиц упрочняющей γ' -фазы после закалочного охлаждения.

Требования к данному виду термической обработки, выдвигаемые применительно к крупногабаритным заготовкам дисков ГТД из гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов, в основном состоят в том, что при обработке на γ -твердый раствор температурное поле заготовки диска перед началом закалочного охлаждения должно быть однородным по всему сечению для обеспечения изотропной структуры и, следовательно, стабильных механических характеристик конечного изделия, а длительность выдержки должна обеспечивать прогрев всей заготовки и полное прохождение диффузионных процессов при переходе жаропрочного никелевого сплава в однофазное состояние.

Таким образом, закалочное охлаждение должно максимально, насколько это возможно, фиксировать пересыщенный γ -твердый раствор для обеспечения требуемых механических характеристик после процесса старения.

С увеличением массы диска при охлаждении с печью до температуры ступени усиливается отставание температуры центра массивной части от температуры края, что к моменту выгрузки диска из печи формирует более отличающиеся по размеру выделения γ' -фазы, но вместе с тем растет различие в скоростях охлаждения края и центра массивной части, что, в свою очередь, выравнивает разницу размеров выделений γ' -фазы. Следовательно, такая схема термической обработки обеспечивает сравнительно однородный уровень механических свойств на заготовках достаточно больших масс.

В современных гранулируемых жаропрочных никелевых сплавах при используемых скоростях охлаждения процесс распада γ -твердого раствора полностью не подавляется. Поскольку из-за разных скоростей охлаждения процесс распада γ -твердого раствора при закалочном охлаждении массивного изделия происходит с разной полнотой (в центре полнее, чем на периферии), то к моменту закалочного охлаждения (т. е. выгрузки изделия из печи) по сечению изделия следует сформировать неодинаковые по размеру выделения γ' -фазы (в центре мельче, чем на периферии). Такую структуру можно получить при замедленном охлаждении с печью до температуры, лежащей

в двухфазной области без последующей выдержки при этой температуре (ступенчатая схема термической обработки): обработка на γ -твердый раствор в однофазной области, замедленное охлаждение с печью до температуры неполной закалки, лежащей в двухфазной ($\gamma+\gamma'$)-области, и далее — ускоренное охлаждение.

Список источников

- [1] Гарибов Г.С., Гриц Н.М., Добаткин В.И. Металлургия гранул жаропрочных никелевых сплавов. *Технология легких сплавов*, 2015, № 2, с. 34–39.
- [2] Зверева Е.А. Исследование влияния условий кристаллизации на структуру гранул и свойства компактированных изделий из жаропрочных никелевых сплавов. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 1979, 23 с.
- [3] Белов А.Ф., Аношкин Н.Ф., Гриц Н.М. и др. Особенности легирования жаропрочных сплавов, получаемых методом металлургии гранул. В кн.: *Жаропрочные и жаростойкие стали и сплавы на никелевой основе*. Москва, Наука, 1984, с. 31–36.
- [4] Fatkullin O.Kh., Yeriomenko V.Y. Microstructural Formation during Hot Isostatic Pressing and Heat Treatment of EP741NP Ni-base Superalloy. *Proc. of Hot Isostatic Pressing*. Boston, 1996.
- [5] Гарибов Г.С., Гриц Н.М., Волков А.М. и др. Металловедческие аспекты производства заготовок дисков из гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов методом ГИП. *Технология легких сплавов*, 2014, № 3, с. 54–58.
- [6] Белов А.Ф., Аношкин Н.Ф., Гарибов Г.С. Разработка и внедрение промышленной технологии производства крупногабаритных дисков и пустотелых валов из гранул жаропрочных никелевых сплавов горячим изостатическим прессованием. *Металлургия гранул*, 1983, вып. 1, с. 173–186.
- [7] Петрушин Н.В., Зайцев Д.В., Светлов И.Л., Карашаев М.М., Епишин А.И. Механизмы ползучести в интервале температур 750–850 °С жаропрочного никелевого сплава с нулевым γ/γ' -мисфитом. *Труды ВИАМ*, 2023, № 12, ст. 01. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2023-0-12-3-18>
- [8] Светлов И.Л., Петрушин Н.В., Епишин А.И., Карашаев М.М., Елютин Е.С. Монокристаллы жаропрочных никелевых сплавов, легированных рением и рутением (Обзор). Часть 1. *Авиационные материалы и технологии*, 2023, № 1, ст. 3. <https://doi.org/10.18577/2713-0193-2023-0-1-30-50>
- [9] Светлов И.Л., Петрушин Н.В., Епишин А.И., Карашаев М.М., Елютин Е.С. Монокристаллы жаропрочных никелевых сплавов, легированных рением и рутением (Обзор). Часть 2. *Авиационные материалы и технологии*, 2023, № 2, ст. 13. <https://doi.org/10.18577/2713-0193-2023-0-2-3-22>