

Отзыв официального оппонента
на диссертационную работу Тягунова Андрея Геннадьевича
«Влияние структурного состояния жаропрочных
никелевых расплавов на технологические параметры производства,
структурно-фазовую стабильность и функциональные свойства изделий»,
представленную на соискание учёной степени доктора технических наук
по специальности 2.6.17. Материаловедение

В диссертационной работе А.Г. Тягунова разработаны теоретические положения, выявляющие сущность и температурно-временные закономерности структурных изменений в сплавах на основе никеля, находящихся в жидком состоянии, и изложены новые научно обоснованные технологические решения для повышения комплекса технологических и служебных свойств жаропрочных никелевых сплавов при помощи высокотемпературной обработки расплава.

Актуальность темы диссертации объясняется необходимостью постоянного совершенствования материалов для газотурбинных двигателей с целью повышения их рабочей температуры и длительности службы и снижения зависимости промышленности от дорогих и труднодоступных импортных легирующих добавок. Диссертационная работа А.Г. Тягунова направлена на повышение комплекса свойств жаропрочных никелевых сплавов за счёт термовременной обработки в жидком состоянии, то есть без изменения их химического состава.

Работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Она написана на 310 страницах, содержит 76 рисунков и 5 таблиц, список использованной литературы насчитывает 444 источника.

Во *введении* обосновывается актуальность и обсуждается степень разработанности темы исследования, формулируются его цели и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, перечисляются методы, материалы и источниковая база, приводятся выносимые на защиту положения.

В *первой* главе приведены сведения о принципах легирования современных жаропрочных никелевых сплавов и технологии производства изделий из них. Обсуждены факторы, которые определяют стабильность структуры сплавов при длительной высокотемпературной эксплуатации, и пути повышения этой стабильности. Сделан вывод, что возможности повышения жаропрочных свойств сплавов за счёт изменения их состава и использования новых легирующих элементов к настоящему времени практически исчерпаны, и резервом для такого повышения могут служить новые способы их обработки, в частности, высокотемпературная обработка расплава, научное обоснование которой и является предметом работы автора.

Во *второй* главе приведены результаты изучения влияния различных режимов нагрева и выдержки никелевых сплавов в жидком состоянии на микронеоднородность их структуры. Большинство исследований выполнены на промышленных жаропрочных сплавах (ЖС6У, ЖС26, ЖС36 и нек. др.) методом измерения электрического сопротивления. Обнаружены явления гистерезиса кривых нагрева и охлаждения: при нагреве в определённом интервале температур (50–200 °С), обозначенном автором $T_{ан...}T_k$ и начинающемся на 100–200 °С выше ликвидуса, происходит быстрое возрастание электросопротивления приблизительно на 10 %, но при охлаждении от температур выше верхней границы этого интервала T_k обратного падения электросопротивления не происходит. Изотермические выдержки в интервале $T_{ан...}T_k$ длительностью около 1–2 ч также приводят к возрастанию электросопротивления. Последующее термоциклирование в области жидкого состояния или в интервале от ликвидуса до солидуса не приводит к восстановлению гистерезиса; он снова появляется только после кристаллизации и охлаждения до комнатной температуры. Температурные интервалы проявления и сам характер эффекта зависят от состава сплава, в особенности от содержания углерода — даже в пределах от 0 до 0,1 мас. %С.

Анализируя наблюдавшиеся закономерности, автор сделал заключение, что гистерезис обусловлен наличием в расплаве микроскопических атомных ассоциаций (кластеров) трёх типов, наследующих стехиометрию твёрдых фаз γ' -Ni₃(Ti, Al), МС и МN. Согласно проведённым оценкам, размеры кластеров

уменьшаются с $\sim 25 \text{ \AA}$ (что соответствует объёму порядка 10^3 атомов) вблизи температуры ликвидуса до $\sim 2,5 \text{ \AA}$ (моноатомная жидкость) при перегреве около $400 \text{ }^\circ\text{C}$ над нею.

В *третьей* главе описываются эксперименты по изучению влияния температуры перегрева расплава на процессы формирования структуры никелевых сплавов при кристаллизации. Показано, что с повышением температуры нагрева в интервале $T_{\text{ан}} \dots T_{\text{к}}$ понижаются температуры ликвидуса и солидуса при последующем охлаждении и уменьшается интервал между ними, а в случае нагрева до температур выше $T_{\text{к}}$ интервал кристаллизации вновь расширяется. Металлографией, в том числе количественной, показано, что с повышением температуры перегрева расплава, и особенно вблизи $T_{\text{к}}$, происходит диспергирование литой структуры и уменьшение доли эвтектики и избыточных карбидов. Качественной металлографией показано, что в ходе выдержек при $820\text{--}1150 \text{ }^\circ\text{C}$ в сплавах, перегретых перед кристаллизацией до $T_{\text{к}}$, процессы деградации структуры (коагуляции частиц γ' -фазы и карбидов M_3C , выделения частиц M_6C , σ -фазы и т.п.) происходят с задержкой на $100\text{--}200$ ч.

В *четвёртой* главе приводится подробный обзор данных различных работ, включая работы автора, об опыте применения высокотемпературной обработки расплава (ВТОР) для улучшения структуры и свойств промышленных никелевых сплавов, преимущественно литейных. На основе обобщения этого опыта делается вывод, что применение ВТОР не только делает структуру сплавов более однородной и дисперсной, повышает структурную стабильность и характеристики жаропрочности, но и повышает технологичность сплавов (снижает количество литейных дефектов, снижает пористость и ликвацию и т.д.). Однако, как подчёркивает автор, положительный эффект наблюдается лишь в тех случаях, когда высокотемпературные режимы выплавки назначаются научно обоснованно, — при произвольно выбранных термовременных параметрах обработки вместо улучшения структуры и свойств сплавов можно получить их ухудшение.

В *пятой* главе описывается создание базы данных и математической модели на основе искусственной нейронной сети для прогнозирования пре-

делов длительной прочности никелевых жаропрочных сплавов. База данных включает в себя 350 химических составов по 3–5 значений предела длительной прочности для каждого из них. Разработанная модель, в ходе разработки которой было произведено искусственное пополнение исходной базы данных недостающими значениями, позволяет рассчитывать предел длительной прочности для заданного состава сплава, температуры и времени испытания и обеспечила на тестовой выборке среднюю относительную ошибку 15 %. Применение модели для расчёта предела длительной прочности σ в широком диапазоне значений параметра Ларсона–Миллера P_{LM} позволило определить для каждого сплава из базы данных значения коэффициентов принятой автором зависимости $\sigma(P_{LM})$, в том числе коэффициент p , определяющий «ширину» сигмоидальной кривой, то есть скорость деградации структуры сплава. На графике в координатах $\sigma \cdot p$ — σ (рис. 5.16) точки для промышленных сплавов разнообразного состава оказались лежащими вблизи прямой линии. Вблизи этой же прямой лежат и экспериментальные точки для сплавов, подвергнутых ВТОР: они оказываются смещены вдоль этой прямой к большим значениям по сравнению с точками для тех же сплавов при стандартной технологии литья. Таким образом, как пишет автор, применение ВТОР позволяет получать изделия с максимальной для данного сплава жаропрочностью и фазовой стабильностью.

Наконец, в *заключении* обобщаются основные полученные в ходе исследования результаты и даются рекомендации по их использованию.

При прочтении диссертации возникли следующие замечания и вопросы.

1. Демонстрируя положительное влияние ВТОР на стабильность структуры никелевых суперсплавов при температурах эксплуатации (гл. 3), автор опирается только на структурные исследования, однако не приводит экспериментально определённых характеристик жаропрочности (например, предела длительной прочности). В какой мере обосновано распространение сделанных выводов со структурных характеристик на механические?

2. При обсуждении формирования структуры никелевых сплавов и динамики её изменения в ходе выдержек при эксплуатационных температурах автор сосредоточивает своё внимание на исходном литом состоянии, но почти ничего не говорит о термической обработке готовых изделий. Какие изменения она вносит в структуру сплавов, подвергнутых ВТОР, по сравнению со сплавами, отливаемыми по существующей технологии? Требуется ли корректировка режимов термообработки для сплавов, подвергнутых ВТОР?

3. Эффекты значительного изменения температур начала и завершения кристаллизации с повышением температуры перегрева расплава, по данным автора, чётко проявляются у одних сплавов и гораздо менее явно у других (гл. 3, рис. 3.3, 3.4). Он связывает это с тем, что «сплав <ЖС6У> изначально хорошо подготовлен по химическому и фазовому составу» (с. 145 бумажного экземпляра диссертации). Не может ли это означать, что наблюдавшиеся в других сплавах эффекты связаны не с изменением кластерной структуры жидкости, а с присутствием в ней примесей и посторонних включений, перераспределяющихся или растворяющихся при повышении температуры нагрева? Не может ли свидетельствовать о том же и продолжение изменений при нагреве выше температуры T_k , когда, в соответствии с развиваемыми автором представлениями, структура жидкости должна быть равновесной и микрооднородной?

4. В гл. 2 (11-й раздел) автор показывает, что значения и даже набор температур начала и завершения структурных переходов в расплаве сильно зависят от содержания углерода. В связи с этим как должны назначаться режимы ВТОР при её промышленном использовании: не потребуется ли предварительно определять критические температуры отдельно для каждой плавки? И зависят ли эти температуры только от химического состава, то есть стабильны ли для металла одной и той же плавки?

5. В том же 11-м разделе главы 2 автор делает вывод о решающей роли присутствующих в структуре жидкости кластеров разного состава ($Ni_3(Ti, Al)$, MC и MN) в процессах кристаллизации. Однако при разработке модели кластерного строения жидкости (8–9-й разделы той же главы) он никак не учитывает ни химического состава кластеров, ни возможности суще-

ствования разных их типов. Что даёт ему основания описывать жидкое состояние изученных им сплавов такой моделью?

6. В гл. 5, строя графики для сравнения предела длительной прочности различных сплавов σ_{1000}^{1000} (рис. 5.13 и 5.16), автор откладывает по оси абсцисс введённый им параметр фазовой стабильности PS. Однако этот параметр, определяемый уравнением (5.31), уже включает в себя σ_{1000}^{1000} как сомножитель. Не получаются ли графики на рис. 5.13 и 5.16 гладкими и монотонными потому, что по обеим осям отложена, в сущности, одна и та же величина?

Несмотря на замечания, общая оценка диссертационной работы положительна. В ней выполнен большой объём трудоёмких высокотемпературных экспериментов, последовательно проанализированы их результаты, создана физическая модель происходящих при нагреве никелевых сплавов в жидкой области процессов, даны рекомендации по назначению режимов обработки сплавов при их промышленном литье, разработан эффективный метод моделирования жаропрочных свойств сплавов.


Основные результаты диссертационного исследования *обоснованны и достоверны*, поскольку базируются на большом объёме экспериментальных данных, значительная часть которых *нова* и получена лично автором. Предложенные теоретические объяснения выявленных эффектов *новы*, имеют экспериментальное подтверждение, при этом не противоречат существующим представлениям и являются их развитием.

Результаты диссертационной работы прошли апробацию более чем на 30 международных и российских конференциях, опубликованы в 2 монографиях и 37 статьях в рецензируемых научных изданиях, защищены 6 патентами.

По моему мнению, диссертация «Влияние структурного состояния жаропрочных никелевых расплавов на технологические параметры производства, структурно-фазовую стабильность и функциональные свойства изделий» *соответствует специальности 2.6.17*. Материаловедение по техническим наукам и *требованиям* п. 9 Положения о присуждении учёных степеней в ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Прези-

дента России Б.Н. Ельцина», предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук, а её автор А.Г. Тягунов *заслуживает присуждения* ему учёной степени доктора технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение.

Доктор физико-математических наук, доцент,
профессор кафедры термообработки и физики металлов,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,


Окишев Константин Юрьевич

30 мая 2024 г.

Адрес: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19;
телефон: (343) 375-48-03;
e-mail: konstantin.okishev@urfu.ru.

Подпись Окишева К.Ю. заверяю:

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
УРФУ
МОРОЗОВА В.А.

