

УДК 621.791(92+046):669.245

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РЕМОНТА ЛОПАТОК ИЗ НИКЕЛЕВЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ: ОБЗОР

канд. техн. наук А.В. ЯРОВИЦЫН;

канд. техн. наук Г.Д. ХРУЦОВ; канд. техн. наук Н.О. ЧЕРВЯКОВ  
(Институт электросварки имени Е.О. Патона НАН Украины, Киев)

*Применение в качестве материала лопаток современных газотурбинных двигателей из труднообрабатываемых и трудносвариваемых никелевых жаропрочных сплавов вызывает необходимость поиска приемлемых компромиссных решений при выборе базовых технологических операций ремонта лопаток для обеспечения требуемого уровня служебных свойств восстанавливаемых изделий и снижения продолжительности, трудоемкости и стоимости ремонта. Выполнен анализ известных способов сварки и рекомендаций для улучшения свариваемости таких материалов с точки зрения обеспечения технологичности в процессе серийного ремонта ответственных деталей газотурбинных двигателей, показаны преимущества процесса микроплазменной порошковой наплавки. Предложены перспективные направления исследований в области сварки плавлением данных сплавов.*

**Ключевые слова:** микроплазменная порошковая наплавка, ремонт лопаток, жаропрочные сплавы.

На сегодняшний день проблема свариваемости жаропрочных никелевых сплавов с содержанием  $\gamma'$ -фазы более 40...45% , несмотря на многочисленные отечественные и зарубежные исследования, окончательно не решена. Это в значительной мере ограничивает применение сварки плавлением при ремонте дорогостоящих рабочих и сопловых лопаток первых ступеней современных наземных и авиационных газотурбинных двигателей (ГТД). В связи с недостаточной свариваемостью таких жаропрочных никелевых сплавов наиболее широко распространен ремонт без применения сварки плавлением [1–6]. Ремонтные технологии данного типа предусматривают восстановление структуры и уровня свойств материала лопатки, а также защитных покрытий. Они, как правило, применяются, когда лопатки ГТД имеют небольшой отработанный ресурс. Повреждения в виде износа, трещин и прогаров носят случайный характер и количество таких лопаток в комплекте незначительно [1–6]. Тогда мелкие дефекты на профильной части и деградировавший слой устраняются механической обработкой, а лопатки с недопустимыми для дальнейшей эксплуатации дефектами заменяются.

Восстановление структуры лопаток ГТД при ремонте осуществляется вакуумной термической обработкой [3–5] или горячим изостатическим прессованием (ГИП) [1; 2; 6; 7]. Недостатком традиционной термической обработки в виде ауستنитизации и последующего старения является неполный возврат к исходной структуре материала лопатки, а следовательно и к его прочностным характеристикам вследствие невозможности удаления образовавшейся в процессе ползучести микропористости [1]. С этой целью создан новый процесс ГИП, основанный на одновременном воздействии высокой температуры и высокого давления в течение нескольких часов для уменьшения образовавшейся в процессе эксплуатации лопатки микропористости размером до 5...10 мкм [1; 2; 6; 7]. Горячее изостатическое прессование увеличивает на 20...30% предел выносливости  $\sigma_{-1}$  и в 2...2,5 раза улучшает термоусталостные характеристики лопаток [1]. Недостатками ГИП, ограничивающими его применение в ремонтных технологиях для лопаток ГТД, является трудность залечивания поверхностных дефектов [7], сложность технологического процесса, уникальность и высокая стоимость оборудования.

В случае если эксплуатационные повреждения (недопустимые дефекты) лопаток носят системный характер, составляя до 100% лопаток в комплекте [8–26], возникает необходимость нанесения на лопатку некоторого количества наплавленного металла с целью восстановления исходной формы лопатки или заваривания трещин [8–26]. При этом в зависимости от степени деградации материала лопатки при эксплуатации его структура может либо восстанавливаться [15], либо не восстанавливаться [8–11; 16; 17]. Если структура материала лопатки не восстанавливается, то теплозащитные покрытия локально удаляются только в местах ремонтной сварки [8–11; 16; 17]. При этом температура термической обработки после ремонтной сварки ограничивается в пределах 1000...1050 °С [8; 16; 17], что не нарушает целостности теплозащитных покрытий на бандажных полках, трактовых поверхностях пера, а также на внутренней полости лопатки.

Технологии восстановления лопаток ГТД с применением сварки плавлением позволяют значительно продлить их эксплуатационный ресурс и имеют в большинстве случаев высокую экономическую эффективность. Однако на сегодняшний день их широкое распространение ограничено недостаточной свариваемостью никелевых жаропрочных сплавов [27–30].

Согласно современным представлениям, никелевые жаропрочные сплавы содержат упрочняющую  $\gamma'$ -фазу на основе  $Ni_3(Al, Ti)$ , в состав которой входят Nb, Ta, Hf и, частично, W. Ее количество, а также

тепловая и структурная стабильность определяют уровень жаропрочности никелевых сплавов [27; 31; 32]. При увеличении суммарного содержания Al и Ti более 6% такие сплавы содержат 45...65 объемных %  $\gamma'$ -фазы и, по данным ряда работ [27–30], ранее считались несвариваемыми ввиду высокой склонности к образованию горячих трещин как при сварке, так и трещин при послесварочной термической обработке.

С позиций микроструктуры возникновение трещин при сварке плавлением в жаропрочных никелевых сплавах с содержанием  $\gamma'$ -фазы от 8 до 60% обусловлено образованием в зоне термического влияния зоны с более мелкой (0,05...0,15 мкм)  $\gamma'$ -фазой по сравнению с остальным основным металлом (0,4...0,9 мкм) [33]. Такая зона появляется вследствие  $\gamma + \gamma' \rightarrow \gamma \rightarrow \gamma + \gamma'$ -преобразования под действием термического цикла сварки и способствует росту напряжений на границе зерна в поликристаллических жаропрочных сплавах на основе никеля. Доступный диапазон изменения скоростей охлаждения сварного соединения при сварке плавлением не позволяет избежать возникновения этой зоны, а лишь только позволяет изменять ее размер в пределах 0,3...1,3 мм [33].

С точки зрения напряженно-деформированного состояния металла образование горячих трещин при сварке никелевых жаропрочных сплавов обусловлено наличием температурных интервалов хрупкости при сварке плавлением – высокотемпературного ТИХ-1 (от  $T_L$  до 1200...1100 °С) и низкотемпературного ТИХ-2 (от 1200...1100 до 900...650 °С). Если при охлаждении сварного соединения темп нарастания растягивающих деформаций превышает критическую величину деформаций такого сплава в температурном интервале хрупкости, в процессе сварки плавлением возникают горячие трещины [34].

Образование трещин при термической обработке сварных соединений жаропрочных никелевых сплавов связано с суммарным действием объемных напряжений, вызванных выделением из твердого раствора  $\gamma'$ -фазы, и остаточных напряжений, возникших под воздействием термического цикла сварки [30].

Применение в качестве материала лопаток современных ГТД труднообрабатываемых и трудносвариваемых жаропрочных никелевых сплавов вызывает необходимость поиска приемлемых компромиссных решений при выборе базовых технологических операций ремонта лопаток для обеспечения требуемого уровня служебных свойств восстанавливаемых сваркой плавлением изделий и снижения продолжительности, трудоемкости и стоимости их ремонта.

Известны следующие технологические рекомендации для улучшения свариваемости никелевых сплавов с высоким содержанием  $\gamma'$ -фазы, основанные на применении:

- присадочных материалов с более низким по сравнению с основным металлом уровнем жаропрочности [8; 9; 14; 28; 35];
- специальной термической обработки перед сваркой [28; 29; 33];
- горячего изостатического прессования перед сваркой [7];
- режимов сварки, ограничивающих глубину проплавления основного металла [8–13; 16; 17; 19; 29; 36];
- сварки на элементах лопаток, которые характеризуются одноосным или ограниченно двухосным малонапряженным состоянием при сварке [8–14; 18; 19; 29; 36];
- сварки с сопутствующим высокотемпературным подогревом [20; 29; 37];
- ограничения скорости сварки [16; 30; 38];
- способов сварки с присадкой порошка [14; 18–22].

Все перечисленные технологические рекомендации в той или иной мере изменяют напряженно-деформированное состояние сварного соединения. Однако по непосредственному влиянию их можно разделять как воздействующие на следующие показатели:

- структуру основного и присадочного металла;
- уровень растягивающих напряжений и деформаций в сварном соединении;
- уровень градиентов температуры в температурном поле при нагреве лопатки сварочным источником тепла.

Наиболее широко распространено воздействие на структуру наплавленного металла за счет применения при аргодуговой сварке двух групп сварочных проволок: 1) из гомогенных сплавов типа ЭП367, ЭП595, ЭК22, IN 625; 2) из сплавов с низким содержанием  $\gamma'$ -фазы: ЭП648, ВЖ98, ЭИ437А, ЭП533, Nimonic 90 [8; 13; 28; 35].

К первой группе относятся сварочные проволоки из сплавов, имеющих в своем составе ограниченное количество титана и алюминия (до 1,5%) и легированных молибденом, вольфрамом и ниобием, которые упрочняют твердый раствор и эффективно повышают стойкость против образования горячих трещин. Упрочнение такого наплавленного металла осуществляется за счет выделения при кристаллизации по границам зёрен интерметаллидов системы «никель – молибден», стабильных в зависимости от марки проволоки до 800...900 °С [35]. Такой наплавленный металл имеет более низкую жаропрочность и релаксационную стойкость, чем основной металл, что создает условия для преобладающей релаксации остаточных и объемных напряжений в объеме более пластичного металла шва по сравнению с более жаропрочной околошовной зоной [35]. Механические свойства наплавленного металла данного типа при 800 °С после старения находятся в пределах:  $\sigma_B = 350...460$  МПа,  $\sigma_{02} = 200...410$  МПа,  $\delta = 12...41$  %;  $\sigma_{100} = 100...160$  МПа [35].

Вторую группу представляют сварочные проволоки, содержащие в своем составе свыше 1,5% титана и алюминия [35]. При сварке такими проволоками наплавленный металл после старения дополнительно упрочняется выделениями  $\gamma'$ -фазы в количестве 7...12%, что обеспечивает получение сварных соединений с более высокой жаропрочностью по сравнению со сварочными проволоками из гомогенных жаропрочных сплавов. Механические свойства наплавленного металла данного типа при 800 °С после старения находятся в пределах:  $\sigma_B = 490...560$  МПа,  $\sigma_{02} = 400...470$  МПа,  $\delta = 6...36\%$ , для ЭП533  $\sigma_{100} = 226$  МПа [35]. Сварочные проволоки второй группы имеют уже более низкую стойкость против образования горячих и термических трещин вследствие высокой релаксационной стойкости наплавленного металла [35]. Дополнительным фактором, ограничивающим применение сварочных проволок из никелевых жаропрочных сплавов с содержанием  $\gamma'$ -фазы более 20...25 %, является невозможность волочения проволоки вследствие недостаточной пластичности металла [22].

В отдельную группу можно выделить присадочные материалы для ремонтной наплавки контактных поверхностей рабочих лопаток специальными жаростойкими сплавами [9–12] с целью упрочнения (повышения сопротивляемости этих элементов изнашиванию [38]). В таких случаях могут использоваться как сплавы типа ВЗК, ХТН61 [9; 10], КБНХЛ-2 [36] на кобальтовой основе, так и дисперсионно-твердеющие сплавы на никелевой основе ВЖЛ2, ВКНА-2, ВКНА-2М, ВХ5, ВХ6, ХН50ЮТ [9; 12]. Как правило, эти присадочные материалы изготавливаются в виде прутков и также имеют меньшую жаропрочность по сравнению с основным металлом.

Из-за высокого уровня эксплуатационных напряжений и ограниченной структурной стабильности наплавленного металла возможность использования при ремонте лопаток присадочных материалов с меньшей (по сравнению с основным металлом) жаропрочностью ограничена в большинстве случаев только номенклатурой лопаток, рассчитанной на температуру эксплуатации до 950 °С.

Благодаря компьютерному моделированию напряженно-деформированного состояния лопаток при их эксплуатации возможно некоторое расширение допустимых зон ремонта лопаток при использовании аргодуговой сварки и сварочных проволок ЭП367, ЭП648, ВЖ98. В зонах лопатки с рабочими напряжениями среднего и низкого уровня допускается применение материалов и способов ремонта, которые обеспечивают уровень механических свойств сварных соединений выше действующих нагрузок в лопатке, но ниже механических свойств основного металла [8].

Традиционным является также воздействие на структуру основного металла никелевых жаропрочных сплавов для улучшения свариваемости за счет специальной термической обработки перед сваркой. При перестаривании происходит укрупнение выделений  $\gamma'$ -фазы при неизменной форме и расположении карбидов, что позволяет снизить прочность и повысить пластичность основного металла [33]. В этом случае создаются благоприятные условия для релаксации сварочных напряжений. Однако такой метод повышения трещиностойкости характеризуется наличием сложной многочасовой термообработки с нагревом изделия до температуры аустенитизации (гомогенизации), последующим замедленным охлаждением, а также необходимостью выполнения повторной трехступенчатой термообработки на паспортных режимах жаропрочного сплава для восстановления его жаропрочности. Поэтому применение перестаривания может быть ограничено как с экономической точки зрения (длительная термообработка), так и из-за необходимости полного удаления защитных покрытий на лопатках перед ее длительным нагревом при температурах, превышающих температуру эксплуатации защитного покрытия.

Повышение стойкости против образования горячих трещин при сварке плавлением также достигается при применении термообработки при температуре аустенитизации, повышающей пластичность основного металла перед сваркой [28; 30]. Известно, что при сварке в состаренном состоянии (т.е. в процессе эксплуатации лопаток) жаропрочные никелевые сплавы имеют в 1,5...2 раза более низкую стойкость против образования трещин, чем в аустенитизированном [39]. Применение аустенитизации также снижает уровень остаточных сварочных напряжений [30].

Известны сведения об улучшении свариваемости никелевых жаропрочных сплавов после ГИП [7] за счет ликвидации микропористости и структурной неоднородности.

Наиболее целесообразно дополнительной термической обработкой при восстановлении деталей ГТД повышать свариваемость никелевых жаропрочных сплавов при ремонте дефектов литья на стадии изготовления лопаток. В этом случае температура термической обработки материала может достигать температуры полного растворения  $\gamma'$ -фазы, так как на поверхности лопатки еще не нанесены защитные покрытия. При ремонте лопаток, уже бывших в эксплуатации, для предотвращения нежелательных диффузионных процессов между покрытием и материалом лопатки перед термической обработкой при температуре аустенитизации теплозащитные покрытия должны предварительно удаляться [1–6], а затем перенаноситься. Это, естественно, будет повышать продолжительность, трудоемкость и стоимость их ремонта. В случае локального снятия покрытий только в местах ремонтной сварки температура термической обработки лопаток ограничивается до 1050 °С, а локальные участки покрытия впоследствии восстанавливаются шликерным методом [8; 10; 11].

Технологическим приемом снижения уровня растягивающих напряжений и деформаций в сварном соединении никелевых жаропрочных сплавов является выполнение ремонта сваркой плавлением только в тех местах лопатки, где не возникает значительных объемных напряжений [8; 14; 19; 23; 29]. Часто такие элементы лопаток удачно совпадают с местами основной концентрации их эксплуатационных повреждений: торцы бандажных полок [9–12], верхняя кромка пера лопатки [13; 14; 19; 23], а также участки поверхности в непосредственной близости от выходной кромки [8; 29].

Для снижения уровня растягивающих напряжений и деформаций в сварном соединении никелевых жаропрочных сплавов может применяться и высокотемпературный подогрев перед сваркой. В зависимости от его температуры предварительный подогрев можно рассматривать либо как способ снижения температурных градиентов в зоне термического влияния, либо как способ достижения максимальной пластичности жаропрочного сплава. В первом случае предварительный подогрев до 800...960 °С только снижает количество образовавшихся трещин при сварке жаропрочных никелевых сплавов с высоким содержанием  $\gamma'$ -фазы [29]. Во втором случае при нагреве более 960 °С может достигаться температура максимальной пластичности жаропрочного сплава [18; 29], что позволяет предотвратить образование трещин при сварке плавлением за счет релаксации напряжений.

Применение высокотемпературного подогрева усложняет технологию ремонта лопаток из никелевых жаропрочных сплавов из-за необходимости решения целого ряда технических проблем [9]. Основными из них являются поддержка постоянной температуры лопатки, непрерывная защита нагретой зоны ремонта от окисления, защита сварщика от теплового излучения с нагретой детали в процессе сварки. Следует отметить, что взаимодействие предварительно нагретого перед сваркой (наплавкой) изделия с кислородом воздуха приводит к образованию на его поверхности тугоплавких оксидных пленок [29], значительно ухудшающих формирование наплавляемого металла [12; 16].

Таким образом, применение высокотемпературного подогрева перспективно лишь при сочетании ряда условий: автоматический процесс сварки (наплавки); вакуум или инертная атмосфера для защиты поверхности нагретой лопатки от окисления; оснащение сварочной камеры оснасткой для подогрева изделий. Выполнение этих условий для сварочного оборудования неизбежно увеличивает продолжительность, трудоемкость и стоимость ремонта лопаток. Имеются данные о применении высокотемпературного предварительного подогрева при сварке плавлением жаропрочных никелевых сплавов: при электронно-лучевой сварке [37], при лазерно-порошковой наплавке в защитной атмосфере инертного газа в сочетании с контролируемым индукционным нагревом и охлаждением лопатки [18].

Регулирование тепловложений в изделие с целью ограничения глубины проплавления основного металла является одним из самых простых и достаточно эффективных методов снижения склонности к образованию трещин при сварке плавлением никелевых жаропрочных сплавов. При традиционной аргонодуговой наплавке оно осуществляется путем: ограничения силы сварочного тока [8–13], регулирования тока по циклу наплавки [9], применения импульсных режимов сварочного тока [9; 12], специальных облегчающих лопатку медных приспособлений [9–12], горения дуги на мерных заготовках из наплавляемого материала [9; 12], импульсной подачи присадочной проволоки [23]. По данным [9–12; 25], при аргонодуговой наплавке бандажных полок лопаток сварочный ток ограничивается до 20...25 А, а эффективная тепловая мощность дуги, соответственно, до 150...200 Вт. В качестве общей рекомендации для аргонодугового процесса следует отметить ограничение величины погонной энергии (по данным [8; 34], до 180...300 Дж/мм). Указанные технологические приемы аргонодугового процесса позволяют обеспечить технологическую прочность основного и наплавленного металла при наплавке и последующей термической обработке только при использовании в качестве присадочных менее жаропрочных материалов по сравнению с основным металлом.

В последние 10...15 лет для решения задач ремонта лопаток из жаропрочных никелевых сплавов с содержанием  $\gamma'$ -фазы более 45% стала активно применяться лазерная наплавка [18; 19; 26] с присадочным материалом, идентичным по химическому составу материалу лопатки. Предельное ограничение погонной энергии (вплоть до 10...40 Дж/мм [26]) позволяет выполнять наплавку с проплавлением основного металла 0,1...0,15 мм при перемещении луча со скоростью 0,1...0,8 м/мин [18; 19; 26]. Применение порошковых присадочных материалов обеспечивает высокую дисперсность структуры наплавленного металла [19]. На практике восстановление кромки лопаток осуществляется многослойной наплавкой с толщиной (высотой) наплавленного слоя 0,15...1 мм [18; 19; 26].

Известно, что многослойная наплавка приводит к суммированию временных сварочных напряжений с остаточными от предыдущих наплавленных слоев. Ввиду высокой релаксационной стойкости жаропрочных никелевых сплавов с высоким содержанием  $\gamma'$ -фазы [30] значительное увеличение количества слоев наплавки может привести к образованию трещин в сварном соединении. Поэтому, вероятно, общая толщина (высота) многослойной наплавки на кромку лопатки при лазерной наплавке может иметь ограничения. Дополнительно следует отметить, что высокая стоимость соответствующего оборудования не способствует широкому распространению процесса лазерной наплавки при ремонте изделий из жаропрочных никелевых сплавов на территории стран СНГ и других.

Анализ большинства известных технологических рекомендаций для сварки плавлением жаропрочных никелевых сплавов показывает ограниченные возможности их практического применения. Поэтому сохраняется актуальность разработки новых технологических процессов восстановления деталей ГТД с использованием сварки плавлением. Основными требованиями к ним являются: необходимый для эксплуатации лопатки уровень жаропрочности сварных соединений; их устойчивость к образованию трещин при сварке и последующей термической обработке в широком диапазоне технологических параметров процесса; минимизация температуры и длительности сопутствующих ремонту термических обработок.

Существующая конъюнктура рынка восстановления сваркой плавлением лопаток ГТД вызывает необходимость поиска новых путей обеспечения свариваемости и повышения служебных характеристик зоны ремонта без значительной перестройки существующих технологических процессов. При этом немаловажную роль играет отсутствие значительных затрат на энергоресурсы, дорогостоящие материалы и капитальные вложения. Проведенные в ИЭС им. Е.О. Патона исследования и практическая апробация в течение 20 лет нового процесса – микроплазменной порошковой наплавки (сварки) – показали возможность обеспечения технологической прочности при сварке плавлением и последующей термической обработке, а также высоких служебных свойств сварных соединений никелевых жаропрочных сплавов с содержанием  $\gamma'$ -фазы более 45% [16; 17; 22; 24; 25]. Микроплазменная порошковая наплавка характеризуется:

- реализацией процесса однослойной наплавки и обеспечением свариваемости жаропрочных никелевых сплавов в широком диапазоне эффективной тепловой мощности дуги и погонной энергии (соответственно 100...650 Вт и 250...3000 Дж/мм [16]);
- возможностью использования присадочного материала, идентичного по химическому составу материалу лопатки, например, для поликристаллических сплавов IN738, ЖС-6У и сплава с направленной кристаллизацией ЖС32-ВИ [16; 17; 24; 25];
- большей производительностью наплавки на узкую подложку по сравнению с аргонодуговой наплавкой (однослойная наплавка высотой 4 мм и более [25]);
- надежной защитой зоны ремонта и хорошим формированием наплавляемого металла при использовании аргоноводородных смесей в качестве защитного газа [16; 17];
- не требуется обязательной предварительной аустенитизации материала лопатки перед сваркой-наплавкой [16; 17];
- не требуется предварительного подогрева [22];
- возможностью многослойной наплавки на высоту примерно до 5...6 мм [41] и комплексного восстановления бандажной полки лопатки, в том числе с Z-образным профилем [42];
- возможностью дополнительного упрочнения восстановленной наплавкой кромки лопатки путем последующей припайки профильной износостойкой пластины [17].

Перечисленные выше достоинства микроплазменной порошковой наплавки позволяют считать ее перспективным процессом, на сегодняшний день наиболее полно отвечающим требованиям ремонта изделий из жаропрочных никелевых сплавов. Это подтверждается внедрением и успешным использованием технологии микроплазменной порошковой наплавки при серийном ремонте деталей авиационных ГТД на украинских предприятиях [17; 40; 41; 42].

**Заключение.** В результате проведенного исследования установлена возможность свариваемости никелевых жаропрочных сплавов рядом способов сварки (наплавки) с различным уровнем жаропрочности присадочного материала: газовой; дуговым разрядом с полым катодом в вакууме; микроплазменной порошковой; аргонодуговой; электронно-лучевой; лазерно-порошковой.

Анализ практического опыта при сварке плавлением никелевых жаропрочных сплавов позволяет предположить наличие обратной зависимости между интенсивностью теплового потока сварочного источника тепла, шириной диапазона удельных тепловложений и погонной энергии, в котором обеспечивается их свариваемость. Решение оптимизационной задачи по управлению интенсивностью теплового потока в изделие, эффективной мощностью дуги и уровнем погонной энергии в перспективе позволит значительно увеличить как восстанавливаемые после эксплуатации зоны лопатки, так и объемы применения сварочных технологий в серийном ремонтном производстве деталей ГТД.

Более детальное изучение особенностей напряженно-деформированного состояния сварного соединения никелевых жаропрочных сплавов с поликристаллической и направленной структурой при нагреве сварочными источниками тепла с различной сосредоточенностью удельного теплового потока позволит расширить существующие представления о технологическом управлении свариваемостью таких материалов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГИП – эффективная схема восстановления турбинных лопаток / В. Булатов [и др.] // Газотурбинные технологии. – 2004. – № 2. – С. 18–20.

2. Кузнецов, В. Критерии ремонтпригодности и технологии восстановительного ремонта рабочих лопаток ГТД / В. Кузнецов, В. Лесников // Газотурбинные технологии. – 2004. – № 1. – С. 26–30.
3. Шайдак, Б. Продление ресурса турбинных лопаток стационарных ГТД / Б. Шайдак, А. Иванов, С. Иванов // Газотурбинные технологии. – 2003. – № 3. – С. 42–45.
4. Быков, Ю. Восстановительный ремонт турбинных лопаток для ГТУ / Ю. Быков, А. Душкин, В. Поклад // Газотурбинные технологии. – 2003. – № 3. – С. 24–26.
5. Оценка эксплуатационного состояния лопаток ТНД агрегата ГТК-25И и технология продления их ресурса / Ю.П. Тарасенко [и др.] // Газотурбинные технологии. – 2004. – № 7. – С. 26–30.
6. Восстановительный ремонт – вторая жизнь авиационных лопаток В.П. Кузнецов [и др.] // Газотурбинные технологии. – 2005. – № 4. – С. 32–34.
7. Гарибов, Г.С. Проблемы развития высокотемпературной газостатической обработки в России / Г.С. Гарибов // Технология легких сплавов. – 2005. – № 1–4. – С. 59–70.
8. Петрик, І.А. Процеси відновлення зварюванням та паянням лопаток газотурбінних двигунів з важкозварюваних сплавів на нікелевій та титановій основі : автореф. дис. ... канд. техн. наук / І.А. Петрик. – Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона. – 2007 р.
9. Перемиловский, И.А. Восстановление наплавкой турбинных лопаток авиационных двигателей / И.А. Перемиловский, В.С. Гейченко, И.И. Фрумин // Автомат. сварка. – 1976. – № 5. – С. 54–56.
10. Петрик, И.А. Дальнейшее развитие технологии упрочнения бандажных полок лопаток турбины из жаропрочных сплавов / И.А. Петрик, И.А. Перемиловский // Технологические системы. – 2001. – № 3. – С. 90–92.
11. Разработка и внедрение высокотемпературного износостойкого сплава для упрочнения бандажных полок лопаток ГТД / Г.И. Пейчев // Технологические системы. – 2000. – № 3. – С. 40–42.
12. Сорокин, Л.И. Аргонодуговая наплавка бандажных полок рабочих лопаток из высокожаропрочных никелевых сплавов / Л.И. Сорокин // Сварочное производство. – 2004. – № 7. – С. 36–39.
13. Аржакин, А.Н. Разработка технологии восстановления рабочих лопаток 8 ступени КВД авиационного двигателя методом автоматической наплавки / А.Н. Аржакин, И.И. Столяров, А.В. Туров // Сварщик. – 2003. – № 4. – С. 8–9.
14. Исследование свариваемости никелевых суперсплавов и разработка технологии ремонта лопаток газовых турбин / К.А. Ющенко [и др.] // Автомат. сварка. – 2005. – № 6. – С. 3–6.
15. Постэксплуатационное состояние лопаток первой ступени ТВД двигателя ДЖ59 и особенности их восстановления / Ю.П. Тарасенко [и др.] // Газотурбинные технологии – 2005. – № 8. – С. 30–32.
16. Яровицин, О.В. Мікроплазмове порошкове наплавлення жароміцних нікелевих сплавів з вмістом  $\gamma'$ -фази 45–65% : автореф. дис. .... канд. техн. наук / О.В. Яровицин. – Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона. – 2009 р.
17. Разработка технологии восстановления торцов бандажных полок рабочих лопаток ТВД авиационного двигателя Д18Т методом микроплазменной порошковой наплавки / К.А. Ющенко [и др.] // Автоматическая сварка. – 2010. – № 8. – С. 25–29.
18. Сварка изделий из суперсплавов : пат. RU 2265505 C2 / Форстер Майкл, Апдегроув Кевин ; опубл. 10.12.2005 // Бюл. № 34.
19. Краузе, С. Улучшенная технология ремонта: порошковая наплавка лазером / С. Краузе // Газотурбинные технологии. – 2003. – № 9–10. – С. 24–36.
20. Неровный, В.М. Технология ремонта поверхностных дефектов на отливках турбинных лопаток / В.М. Неровный // Сварочное производство. – 1998. – № 6. – С. 42–45.
21. Saltsman, G.A. Application of plasma arc welding surfacing in turbine engines / G.A. Saltsman, P. Sahoo // Proceeding of the Fourth National Thermal Spray Conference (Pittsburg, PA, USA, 4–10 May 1991). – P. 540–548.
22. Особенности сварки высоконикелевых дисперсионноотвердеющих жаропрочных сплавов и ремонта изготавливаемых из них изделий / В.С. Савченко [и др.] // Автомат. сварка. – 1993. – № 10. – С. 31–33.
23. Мартышин, Г.В. Аргонодуговая наплавка с импульсной подачей присадочной проволоки при ремонте деталей / Г.В. Мартышин, В.Б. Трунова // Сварочное производство. – 1993. – № 10. – С. 16–17.
24. Yuschenko, K.A. High-Strength Repairs of IN738LC Blades and Vanes / K.A. Yuschenko, L.V. Cherviakova, A.A. Nakonechny // IIW Doc XII-1724-02-2002.
25. Особенности малоамперной аргонодуговой и микроплазменной порошковой наплавки на узкую подложку / А.В. Яровицын [и др.] // Автомат. сварка. – 2009. – № 6. – С. 37–42.
26. Nishimoto, K. Crystal Growth in Laser Surface Melting and Cladding of Ni-Base Single Crystal Superalloy / K. Nishimoto, K. Saida, Y. Fujita // IIW doc. IX-2243-007.
27. Симс, Ч. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / Ч. Симс, Н. Столов, В. Хагель ; пер. с англ. / под ред. Р.Е. Шалина. – М. : Металлургия, 1995. – 384 с.
28. Сорокин, Л.И. Свариваемость жаропрочных сплавов, применяемых в авиационных газотурбинных двигателях / Л.И. Сорокин // Сварочное производство. – 1997. – № 4. – С. 4–11.

29. Сорокин, Л.И. Свариваемость литейных жаропрочных сплавов типа ЖС6 / Л.И. Сорокин, В.И. Лукин, Ю.С. Багдасаров // Сварочное производство. – 1997. – № 6. – С. 12–17.
30. Сорокин, Л.И. Напряжения и трещины при сварке и термической обработке жаропрочных никелевых сплавов / Л.И. Сорокин // Сварочное производство. – 1999. – № 12. – С. 11–17.
31. Каблов, Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия) / Е.Н. Каблов. – М. : МИСИС, 2001. – 632 с.
32. Воздвиженский, В.М. Методика расчетного определения  $\gamma'$ -фазы в жаропрочных никелевых сплавах / В.М. Воздвиженский, А.А. Шатульский, М.А. Красильникова // Справочник. Инженерный журн. – 2002. – № 7. – С. 61–64.
33. Звягинцева, Г.В. Структурні та фазові перетворення в жароміцних нікелевих сплавах і їх роль в утворенні тріщин в зварних з'єднаннях : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Г.В. Звягинцева. – Київ, НТУУ “КПІ”. – 2007 р. – 19 с.
34. Черв'яков, М.О. Напружено-деформований стан та технологічна міцність зварних з'єднань високоміцних нікелевих сплавів : автореф. дис. ... канд. техн. наук / М.О. Черв'яков. – Київ : ІЕЗ ім. Є.О. Патона. – 2007 р. – 17 с.
35. Сорокин, Л.И. Присадочные материалы для сварки жаропрочных никелевых сплавов (обзор) Ч. 1 / Л.И. Сорокин // Сварочное производство. – 2003. – № 4. – С. 35–40.
36. Алтухов А.А. Применение жаростойкого материала КБНХЛ-2 для наплавки деталей газотурбинных двигателей / А.А. Алтухов, О.В. Гаврилов // Сварщик. – 2004. – № 2. – С. 22–23.
37. Jahnke, V. High-temperature electron beam welding of the nickel-base-superalloy IN-738LC / V. Jahnke // Welding Journal. – 1982. – Vol. 61, No 11. – P. 343–347.
38. Пантелеенко, Ф.И. Восстановление деталей машин : справочник / Ф.И. Пантелеенко [и др.] ; под ред. В.П. Иванова. – М. : Машиностроение, 2003. – 672 с.
39. Сорокин, Л.И. Свариваемость жаропрочных никелевых сплавов в состаренном состоянии / Л.И. Сорокин // Автомат. сварка. – 1983. – № 7. – С. 12–16.
40. Технологический семинар Deloro Stellite в Запорожье // Автомат. сварка. – 2010. – № 1. – С. 59–62.
41. Жеманюк, П.Д. Опыт внедрения восстановительной микроплазменной порошковой наплавки при ремонте лопаток турбин высокого давления в условиях серийного производства / П.Д. Жеманюк, И.А. Петрик, С.Л. Чигилейчик // Автомат. сварка. – 2015. – № 8. – С. 43–46.
42. Ющенко, К.А. Совершенствование технологии восстановления верхней бандажной полки рабочих лопаток авиационного ГТД / К.А. Ющенко, А.В. Яровицын // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій споруд та машин : цільова комплексна програма НАН України : зб. наук. ст. за результатами, отриманими в 2010–2012 рр. ; ІЕЗ ім. Є.О. Патона. – Київ, 2012. – С. 506–509.

Поступила 26.01.2016

## THE CURRENT STATE OF REPAIR OF BLADES FROM NICKEL SUPERALLOY USING WELDING POINT: OVERVIEW

A. YAROVYTSYN, G. KHRUSCHOV, N. CHERVYAKOV

*The use as a material of modern gas turbine engine blades from the hard and difficult-nickel superalloys is the need to find acceptable compromises when choosing a basic technological blade repair operations to ensure the required level of service properties of recovered products and reduce the duration and complexity of the repair cost. The analysis of the known methods of welding and recommendations to improve the weldability of these materials in terms of processability during serial repairs of critical parts of gas turbine engines, the advantages of the process of microplasma powder cladding is given. The promising areas of research in the field of fusion welding these alloys are offered.*

**Keywords:** microplasma powder cladding, repair blades, heat-resistant alloys.