



ХАРАКТЕР ОБРАЗОВАНИЯ ГОРЯЧИХ ТРЕЩИН ПРИ СВАРКЕ ЛИТЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Академик НАН Украины **К. А. ЮЩЕНКО**, **В. С. САВЧЕНКО**, д-р техн. наук, **Н. О. ЧЕРВЯКОВ**, **А. В. ЗВЯГИНЦЕВА**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследованы закономерности возникновения горячих трещин в зоне термического влияния (ЗТВ) при сварке плавлением. Предполагается, что при сварке жаропрочного сплава нагрев металла ЗТВ вызывает структурные превращения упрочняющей γ -фазы, сопровождаемые изменением объема металла. Под влиянием деформационных процессов, локализованных в узкой зоне, где структура никелевого сплава некоторое время находится полностью в аустенитном состоянии, наблюдается появление горячих трещин.

Ключевые слова: никелевые жаропрочные сплавы, γ -фаза, зона термического влияния, горячие трещины, твердость, пластическая деформация, интервал провала пластичности

Никелевые жаропрочные сплавы являются основным конструкционным материалом для изготовления газотурбинных двигателей, широко используемых в авиации и других областях техники.

При изготовлении деталей горячего тракта двигателей применяют дисперсионно-твердеющие никелевые сплавы с интерметаллидным упрочнением. С целью обеспечения стабильности структуры и сохранения в течение длительного времени высоких прочностных характеристик осуществляют комплексное легирование никелевых сплавов элементами γ -образователями (алюминий, титан, ниобий), общая массовая доля которых в сплаве составляет 6...15 % и более.

Сложная система легирования и высокие прочностные характеристики сплавов являются причиной образования трещин как в шве, так и в зоне термического влияния (ЗТВ) при сварке изделий даже незначительной толщины. Представляется целесообразным исследовать закономерности возникновения горячих трещин прежде всего в ЗТВ сварных соединений, полученных сваркой

плавлением с происходящими структурными превращениями.

Исследования проводили на никелевом сплаве IN 738, применяемом в качестве конструкционного материала для изготовления лопаток газовых турбин следующего химического состава, мас. %: С 0,09; Cr 16,0; Co 10,5; Mo 1,7; W 4,6; Nb 0,2; Al 3,0; Ti 4,4; Ca \leq 0,01; La \leq 0,01.

Чувствительность металла ЗТВ к образованию трещин при плазменно-порошковой сварке оценивали по составу, идентичному основному материалу. Сварку осуществляли на образце из сплава IN 738 толщиной 10 мм в состоянии поставки на следующем режиме: $I_{св} = 100...120$ А; $U_{д} = 25...26$ В; $v_{св} = 4$ м/ч; размер частиц порошка 50...150 мкм; расход аргона — 18...20 л/мин.

Шлифы для металлографических исследований подвергали вакуумному ионному травлению с использованием высоковольтного плазменного разряда при напряжении 2,5 кВ и токе 0,005 А, что дало возможность обнаружить четкие контуры трещин разного размера. Для контрольного выявления зон структурных превращений в металле ЗТВ использовали изображения, полученные с помощью оптического микроскопа в темном и светлом поле.

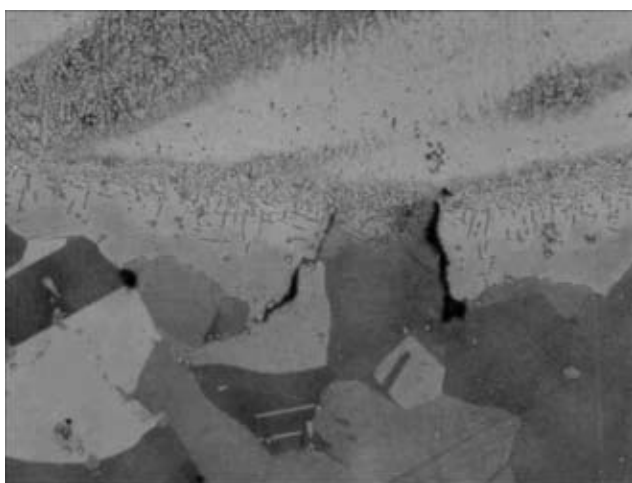


Рис. 1. Микротрещины в металле ЗТВ сварных соединений никелевых сплавов с упрочняющей γ -фазой, $\times 200$

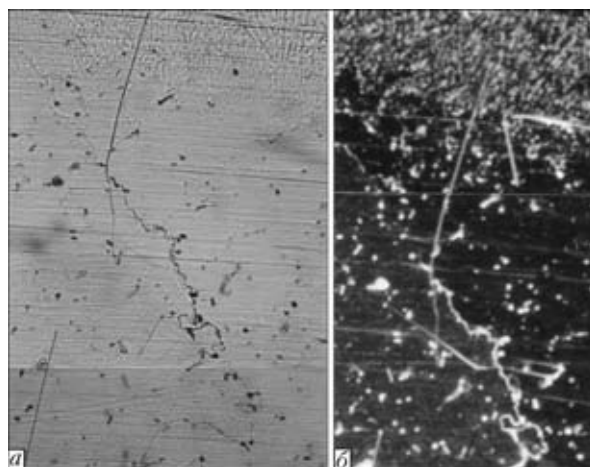


Рис. 2. Изображения ($\times 100$) микротрещин в металле ЗТВ сварного соединения жаропрочного сплава IN 738, полученные в светлом (а) и темном (б) поле

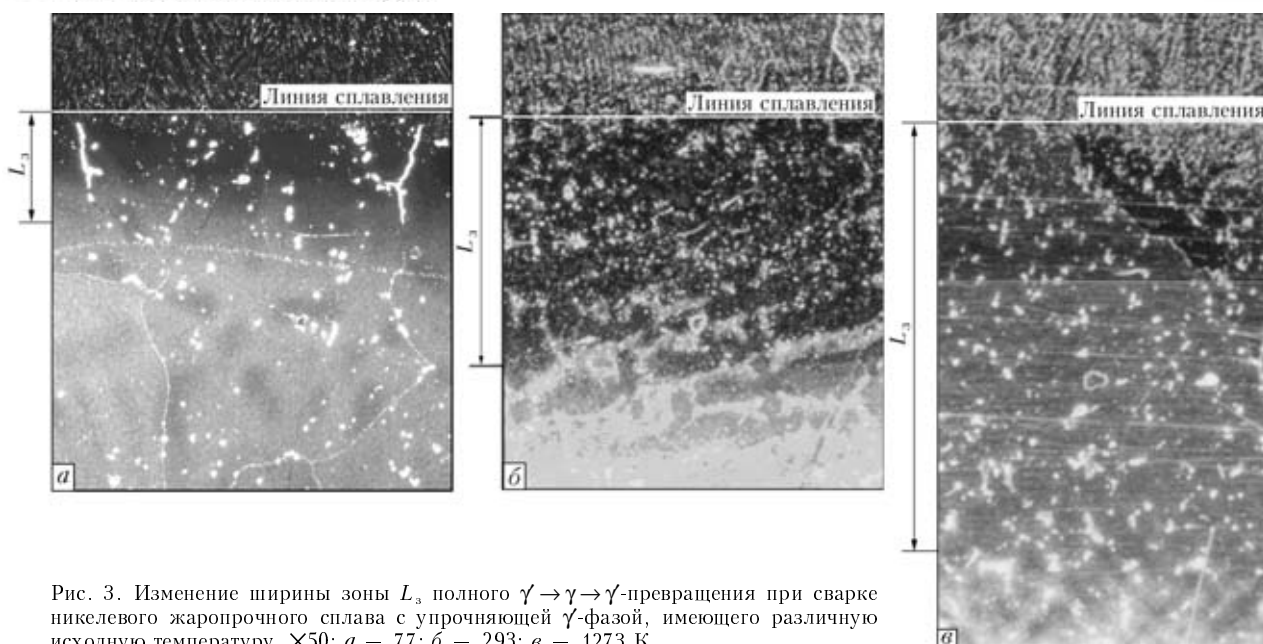


Рис. 3. Изменение ширины зоны L_3 полного $\gamma \rightarrow \gamma \rightarrow \gamma$ -превращения при сварке никелевого жаропрочного сплава с упрочняющей γ -фазой, имеющего различную исходную температуру, $\times 50$: а – 77; б – 293; в – 1273 К

Оценку размеров структурных составляющих металла, в том числе γ -фазы, выполняли на растровом электронном микроскопе после специального травления. Характер пластической деформации при продвижении горячей трещины определяли по изменению профиля поверхности сварного соединения с использованием интерференционного оптического микроскопа.

В ходе металлографических исследований сварных соединений сплава IN 738, проведенных при нормальной температуре свариваемых кромок, в металле ЗТВ обнаружены микротрещины, распространяющиеся в направлении основного металла (рис. 1). При изучении сварных соединений указанного сплава выявлена структурная зона, примыкающая к шву, в которой преимущественно и располагались горячие трещины (рис. 2).

Статистическая обработка результатов исследований показала, что трещины находятся на некотором удалении от линии сплавления. Это позволяет предположить, что образование горячих трещин не всегда обусловлено оплавлением границ зерен при сварке. Это не позволяет отнести их к типичным кристаллизационным трещинам.

Под действием термического цикла сварки в основном металле вблизи линии сплавления образуются зоны с различными свойствами. Изучение

механизма формирования этих зон поможет выявить природу образования горячих трещин.

В общем виде структурные изменения в металле ЗТВ сварных соединений зависят от условий сварки и прежде всего от термического цикла.

Исследовали влияние на формирование рассматриваемой структурной зоны исходных температур свариваемых образцов при неизменных режимах сварки.

Сварку выполняли на металле, предварительно охлажденном до 77 К при комнатной температуре (293 К) и нагретом до 1293 К.

Микроструктура металла ЗТВ сварных соединений сплава IN 738 приведена на рис. 3. Из рисунка видно, что ширина зоны L_3 полного γ -превращения претерпевает значительные изменения. На основе полученных данных построены экспоненциальные кривые зависимости L_3 от температуры (рис. 4). При этом, как подтверждает статистика, наблюдается корреляция между шириной зоны L_3 полного γ -превращения и средней длиной горячих трещин, образовавшихся при сварке металла, имеющего различную исходную температуру.

Оценка микроструктуры металла рассматриваемой зоны позволила выявить наличие в зоне, примыкающей к сварному шву (рис. 5, а, б), частиц мелкодисперсной γ -фазы, отличающихся размером от более крупных частиц γ -фазы в основном металле, которая формируется на некотором удалении от линии сплавления (рис. 5, в).

С помощью растровой электронной микроскопии подтвердилось отличие в строении структуры и размеров частиц γ -фазы в зоне основного металла, расположенной вдали от шва (рис. 6, а), и в зоне образования горячих трещин, примыкающей ко шву (рис. 6, б).

Следовало ожидать, что изменение размеров γ -фазы влияет на прочностные характеристики металла шва, в том числе его поверхности. Из рис. 7 видно, что твердость металла ЗТВ меняется в за-

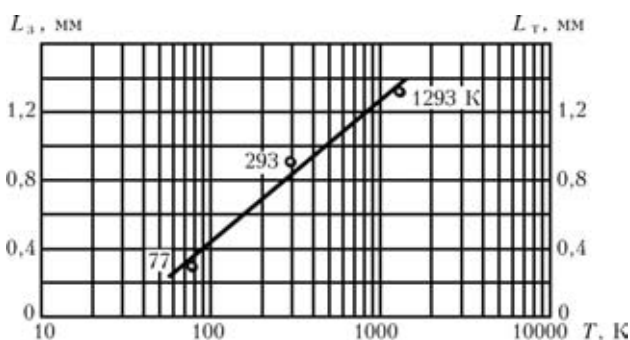


Рис. 4. Влияние исходной температуры сплава IN 738 на среднюю длину трещин L_T и ширину зоны L_3 полного γ -превращения

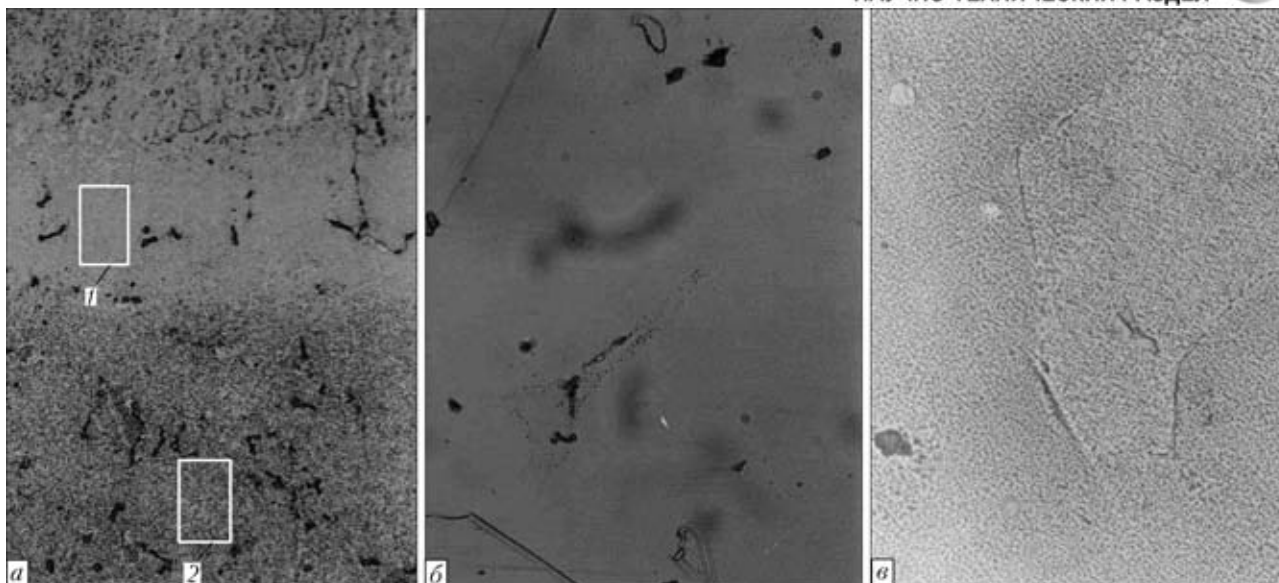


Рис. 5. Микроструктура металла ЗТВ никелевого жаропрочного сплава IN 738: а — общий вид (X50); б, в — соответственно фрагменты 1 и 2 (X500)

висимости от его исходной температуры перед сваркой. Максимальное значение твердости имеют место при сварке металла, предварительно охлажденного до 77 К, минимальные — у металла, полученного при сварке с подогревом.

Таким образом, ширина зоны L_3 полного γ -превращения с повышенной твердостью так же, как и зоны образования трещин, зависит от ис-

ходных температурных условий сварки. При этом минимальная ширина зоны металла с повышенной твердостью имеет место в сварном соединении, выполненном на металле, предварительно охлажденном до 77 К. Указанные отличия можно объяснить влиянием скорости охлаждения металла в температурном интервале $\gamma \rightarrow \gamma'$ -превращения на диаметр частиц γ' -упрочняющей фазы.

В работе [1] показано, что с повышением скорости охлаждения $v_{охл}$ наблюдается уменьшение диаметра частиц γ' -фазы (рис. 8). При этом следует ожидать изменение прочностных характеристик металла сварного соединения, в том числе и твердости.

В общем виде прочность дисперсионно-твердеющих сплавов зависит от расстояния между частицами, их диаметра, объемной доли [2] и определяется формулой

$$\sigma = \sigma_0 + \frac{c\sqrt{f}}{d},$$

где σ_0 — предел прочности матрицы; c — константа, включающая вектор Бюргера и модуль сдвига матрицы; f — объемная доля структурных составляющих.

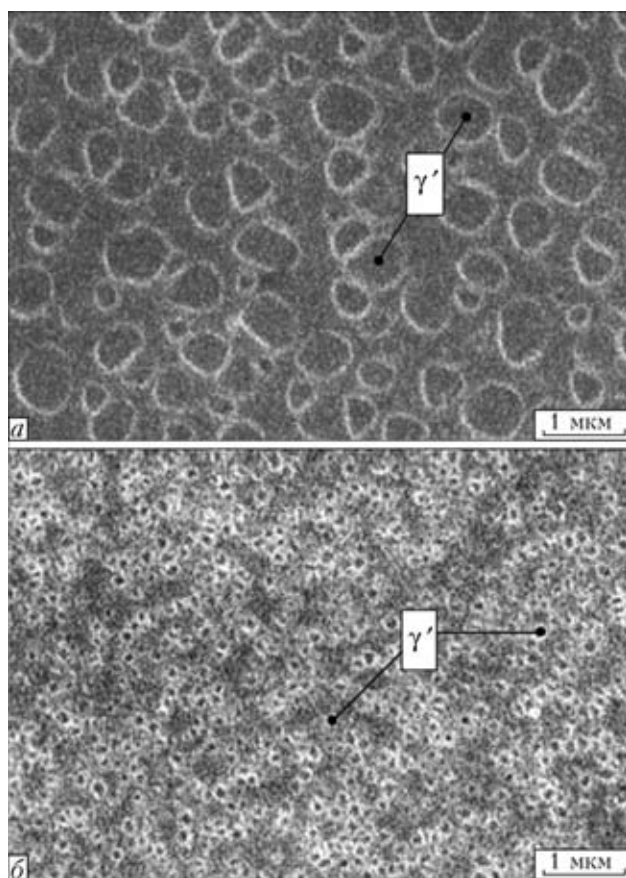


Рис. 6. Размеры частиц упрочняющей γ' -фазы в различных зонах, примыкающих к сварному шву: а — $d = 0,400 \dots 0,900$ мкм (зона основного металла); б — $d = 0,005 \dots 0,150$ мкм (зона образования горячих трещин)

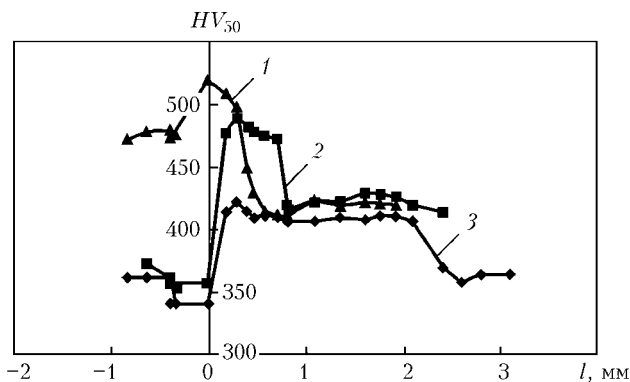


Рис. 7. Зависимость микротвердости металла ЗТВ от его исходной температуры: 1 — охлаждение до 77 К; 2 — комнатная температура (293 К); 3 — подогрев до 1273 К

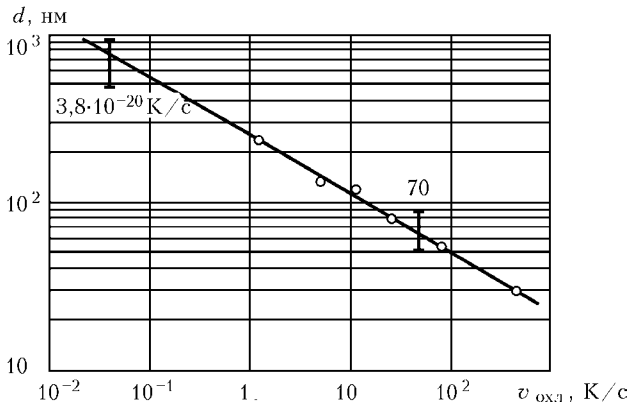


Рис. 8. Изменение среднего диаметра d частиц γ -фазы при охлаждении от температуры $T > T_{п.р}$ (здесь T — исходная температура; $T_{п.р}$ — температура полного растворения частиц γ -фазы); \circ — данные работы [1]

Из уравнения следует, что чем больше объемная доля упрочняющей γ -фазы и меньше диаметр частиц, тем прочнее сплав.

Таким образом, можно утверждать, что металл зоны образования горячих трещин, примыкающей ко шву, обладает повышенной твердостью (прочностью) за счет $\gamma \rightarrow \gamma' \rightarrow \gamma$ -превращения, происходящего под действием термического цикла сварки (нагрев \rightarrow охлаждение) (рис. 9), причем различия в значениях твердости связаны с изменением скорости охлаждения металла при сварке и соответственно процессом $\gamma \rightarrow \gamma'$ -превращения, протекающим при охлаждении металла ЗТВ после продвижения сварочной ванны в направлении линии сварки. Схема преимущественного образования трещин в ЗТВ сварных соединений никелевых сплавов с γ -упрочнением и ее связь со структурными изменениями в ЗТВ показаны на рис. 10.

Продвижение горячей трещины по границам зерен из зоны γ -фазы, где отсутствуют частицы упрочняющей γ' -фазы (рис. 10), в направлении основного металла тормозится за счет релаксации локальных напряжений, возникающих вследствие пластической деформации в устье трещины (рис. 11, а). Из рис. 11, б видно, что имеет место состояние плоской деформации. Очевидно, в этом случае закономерности торможения развития трещины могут быть объяснены исходя из условий образования пластических деформационных зон, описываемых механикой разрушения металлических материалов. Полученные результаты подтверждают оптиче-

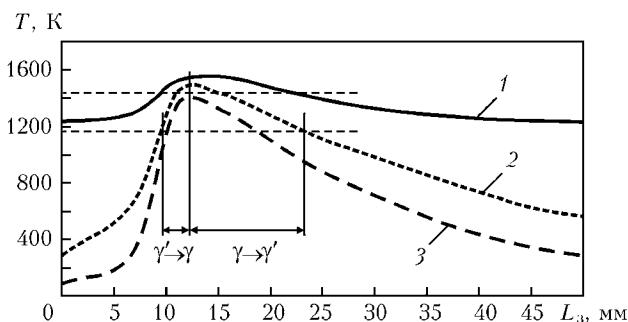


Рис. 9. Распределение температуры в металле ЗТВ сварного соединения сплава IN 738 и характер структурных превращений при реализации термического цикла сварки: 1 — $T = 1273$; 2 — 293; 3 — 77 К

ской интерференционной металлографией поверхности устья горячей трещины, образовавшейся после сварки никелевого сплава. На рис. 12 приведена картина распределения интерференционных линий, полученная в устье трещины, а также в районе искусственной деформации от царапины на поверхности шлифа. Видно, что интерференционные линии в районе устья трещины и царапины имеют тенденцию к перемещению вверх. Поскольку царапина — это углубление в металле, зона металла перед трещиной перемещается вниз относительно плоскости шлифа, т. е. происходит утяжка металла за счет реализации механизма пластической деформации.

Результаты проведенных исследований позволяют предположить наличие следующего механизма образования горячих трещин в ЗТВ при сварке никелевых сплавов с упрочняющей γ -фазой:

1. При сварке сплава нагрев металла ЗТВ вызывает структурные превращения упрочняющей γ -фазы в γ -матрицу. Эти превращения протекают в температурном интервале примерно от $T = 700$ °С до $T_{п.р}$ в зависимости от выбранной системы легирования металла.

2. При $\gamma \rightarrow \gamma'$ -превращении происходит увеличение объема металла, поскольку при повышенных температурах параметры кристаллической решетки γ -фазы меньше, чем γ' -фазы. Это сопровождается развитием интенсивных термдеформационных процессов, которые локализуются в узкой зоне ЗТВ.

3. Существует высокотемпературная зона, примыкающая к шву, в которой структура никелевого сплава некоторое время находится полностью в аустенитном состоянии.

В этом случае происходит обогащение границ аустенитных зерен примесными элементами — углеродом, кислородом, серой, фосфором и другими поверхностно-активными элементами. Влияние пластической деформации на процессы охрупчивания реализуется посредством взаимодействия подвижных дислокаций с примесными атомами и

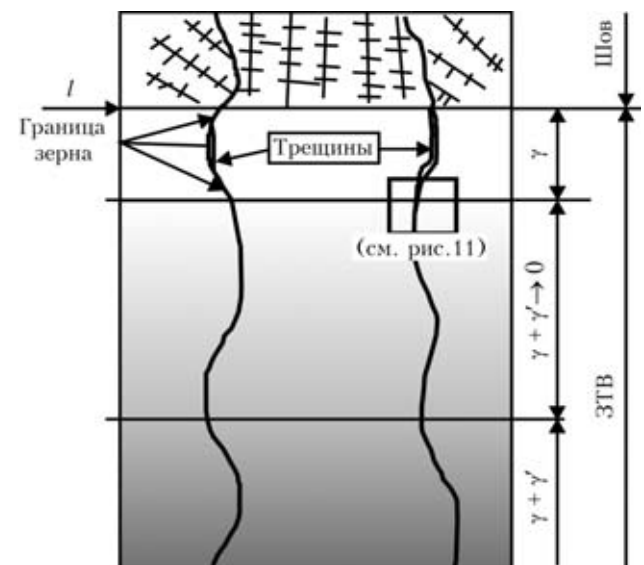


Рис. 10. Схема преимущественного образования трещин в ЗТВ сварных соединений жаропрочных сплавов с упрочняющей γ -фазой

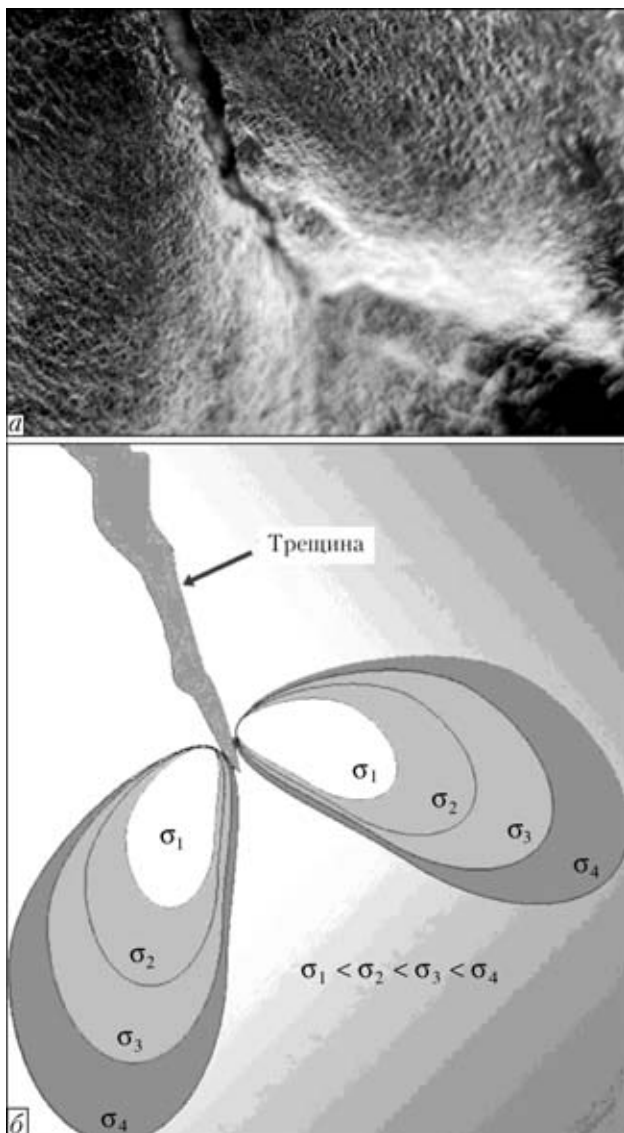


Рис. 11. Торможение развития горячей трещины в ЗТВ под влиянием пластической деформации: *a* — поверхность металла в устье горячей трещины (X400); *b* — схема распределения пластической деформации в полях напряжений ($\sigma_1 \dots \sigma_4$)

определяется конкурирующими температурными процессами, а именно, изменением энергии взаимодействия атомов с дислокациями (обратная температурная зависимость) и диффузионной подвижностью этих атомов (прямая температурная зависимость).

Температурный интервал, в котором сохраняется достаточно высокая энергия связи примесного атома с дислокациями и в то же время обеспечивается его подвижность благодаря увеличению параметров диффузии, является интервалом «провала» пластичности. Именно в этом интервале может осуществляться захват примесного элемента движущимися дислокациями и его транспортировка на границы зерен.

Благодаря последнему обстоятельству изменяется соотношение прочности тела зерна и его границы и происходит образование трещины по границам зерен (по типу трещин «провала» пластичности). Как отмечалось ранее, охрупчивание границ зерен реализуется в зоне, имеющей аусте-

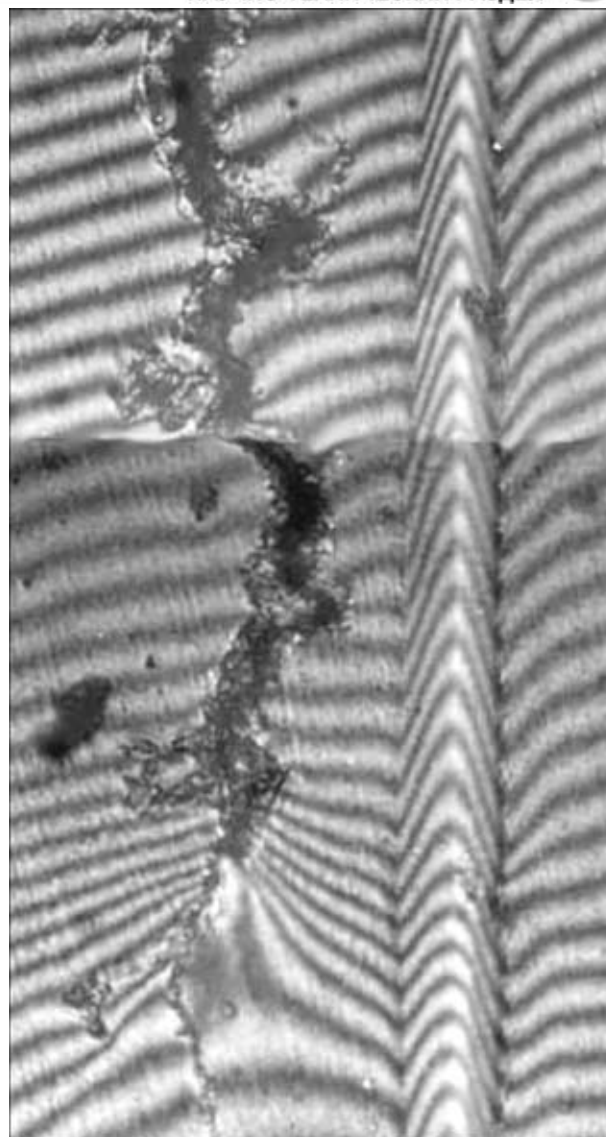


Рис. 12. Картина распределения пластических деформаций в устье горячей трещины

нитную структуру. По мере охлаждения металла происходит выделение γ' -фазы внутри зерен. При этом развиваются, а с увеличением объемной доли γ' -фазы усиливаются процессы торможения перемещения дислокаций, обогащения границ примесными элементами и происходит повышение пластичности металла ЗТВ. В указанном температурном интервале продвижение трещин приостанавливается вследствие пластической деформации в устье трещины.

Выводы

1. Для никелевых сплавов с упрочняющей γ' -фазой типичным является образование трещин по границам зерен в ЗТВ при нагреве-охлаждении в интервале от 700 °С до температур, близких к температуре плавления.

2. Показано, что в процессе сварки в зоне основного металла, расположенной вблизи линии сплавления, происходят фазовые изменения по схеме $\gamma + \gamma' \rightarrow \gamma \rightarrow \gamma + \gamma'$, а также локальная деформация по границам зерен. В возникшей на стыке



зерен трещине (в ее устье) наблюдается релаксация напряжений в интервале от 700 °С до температуры плавления.

3. Горячие трещины могут возникать под влиянием термомеханического нагружения в результате сегрегации примесных элементов на границе зерен с последующим их оплавлением и значительной локальной деформацией в диапазоне температур «провала» пластичности.

4. Для металлов с высокой степенью легирования поверхностно-активными элементами, например бором, образование трещин может происходить по двум механизмам одновременно.

1. *Haafkens M. H., Matthey J. G.* A new approach to the weldability of nickel-base as-cast and powder metallurgy superalloys // *Welding J.* — 1982. — **61**, № 11. — P. 25–30.
2. *Масленков С. Б.* Жаропрочные стали и сплавы. — М.: Металлургия, 1983. — 192 с.

Principles of formation of hot cracks in HAZ during fusion welding have been studied. It is suggested that heating of the HAZ metal in welding heat-resistant alloys causes structural transformations of the strengthening γ -phase, accompanied by changes in metal volume. Hot cracks are formed under the effect of the deformation processes localised in a narrow zone, where structure of a nickel alloy remains for some time in a fully austenitic state.

Поступила в редакцию 25.03.2004

Новости НКМЗ

ПЕРВЫЙ УКРАИНСКИЙ БУРОВОЙ СТАНОК

Еще одну новую горную машину — станок буровой шарошечный СБШС-250Н, предназначенный для бурения вертикальных и наклонных взрывных скважин, выпустил Новокраматорский машиностроительный завод.

Первый украинский буровой станок создан НКМЗ совместно с фирмой «Оркис» (г. Желтые Воды) при активном участии ОАО «Центральный горно-обогатительный комбинат» (г. Кривой Рог). Здесь в ноябре 2003 г. состоялась презентация новой машины.

Заместитель генерального директора по экономике НКМЗ Ю. Чибисов ознакомил гостей, в числе которых главные специалисты ГОКов Украины, России, Узбекистана, с технологическими возможностями завода, позволяющими выпускать современное горнорудное оборудование.

Первый украинский буровой станок имеет множество достоинств, которые выгодно отличают его от российского аналога. О них рассказали авторы проекта — специалисты НКМЗ и фирмы «Оркис». Это улучшенная маневренность и повышенная скорость движения при перемещении из одного района бурения в другой, плавность наезда на скважину. По сравнению с российской украинская машина обеспечивает скорость бурения выше в 1,5 раза. Конструкция станка создает идеальные условия для рабочего инструмента. Еще одно достоинство — управление буровым станком осуществляется с помощью компьютера. А в перспективе эти станки намечено сделать «беспилотными». Один оператор будет управлять с дистанционного пульта несколькими машинами.

ОАО «Центральный горно-обогатительный комбинат», в карьере которого три месяца продолжались испытания нового бурового станка, во время СССР был базовым полигоном для внедрения новых горнодобывающих машин и технологий, и его специалисты имеют в этой области большой опыт. Их авторитетному мнению о возможностях, качестве и надежности новинок традиционно доверяют во всех ГОКах на территории бывшего Союза.

На презентации главные специалисты Центрального ГОКа дали высокую оценку новому буровому станку. Технический директор А. Дмитриенко, кроме его высоких технических характеристик, отметил удобство обслуживания, безопасность и комфорт. Самое главное достоинство — изготовителям до минимума удалось снизить уровень вибрации. А у буровых станков он считается самым высоким, для горной техники. Главный энергетик В. Кириченко отметил, что, основательно испытав новую машину, специалисты Центрального ГОКа не видят на территории СНГ бурового станка, равного по техническому оснащению, технологическим возможностям и удобству обслуживания. Далекое не последнюю роль играет и приемлемая цена нового станка по сравнению с аналогами из дальнего зарубежья. Большого будущего пожелал машине и ее первый оператор Алексей Попов.

Участники презентации увидели непосредственно в карьере как новый станок обрабатывает технологические операции, осмотрели его внутри. Их мнение о новой машине выразил зам. главного механика ГОКа в Навои (Узбекистан) А. Ващенко: «Машина современная и надежная».