

УДК 621.791

Мезомеханика зерна твердого тела в контакте разнородных кристаллических материалов при сварке давлением с нагревом

Абрамов Валерий Васильевич

valabramov@rambler.ru

Жеглова Юлия Германовна

jeglovayug@mgsu.ru

SPIN-код: 1655-7163

НИУ МГСУ, Москва, Россия

Аннотация. Анализ экспериментальных исследований контактного взаимодействия разнородных материалов, представленный в статье, формирует более полное и правильное представление о роли микронапряжений 2-го рода, приводящих к возникновению микропластической деформации зерна по механизму сдвига, что, в свою очередь приводит к возникновению градиента концентрации напряжений на границе раздела фаз, мягкой и твердой прослоек сварного соединения. В процессе распространения субмикротрещины происходит эстафетная передача деформации от зерна к зерну под действием напряжений, компенсированных в объеме зерна, т. е. напряжений 2-го рода, а приложенная нагрузка и вес конструкции создают общий фон напряженного состояния, т. е. напряжения 1-го рода.

Ключевые слова: контактное взаимодействие, методика, эстафетная передача деформации, корунд, медь, микронапряжения 2-го рода, структура, феррит, перлит

Введение. Одной из актуальных проблем сварных строительных металлических конструкций (ССМК) является повышение их надежности и работоспособности при эксплуатации, в том числе при отрицательных температурах, когда имеет место резкое падение пластических свойств металла, особенно в зоне термического влияния (ЗТВ), что резко повышает склонность металла конструкции к внезапному хрупкому (квазихрупкому) разрушению, протекающему практически мгновенно и без заметных предшествующих макропластических деформаций. С этих позиций работоспособность и надежность при эксплуатации большого класса сварных металлических конструкций различного назначения (резервуары, котлы, емкости, сосуды высокого давления, трубопроводы, листовые и трубчатые конструкции, перекрытия, мосты, эстакады, фермы и др.) в значительной степени будут определяться способностью металла сварного соединения сопротивляться возникновению и распространению трещин. Зародышем субмикротрещины является полоса (пачка) скольжения, возникающая в более мягкой (феррит) структурной составляющей строительной конструкционной стали, например перлитного класса (феррит + перлит ($\Phi + \text{Fe}_3\text{C}$)) [1]. При распространении субмикротрещина может упереться в карбид железа (Fe_3C) и либо расколоть его, либо остановиться или обойти его. В случае раскола или обхода карбида железа процесс распространения (разрушения) микротрещины продолжится со скоростью распространения продольных звуковых колебаний в данной среде. В процес-

се распространения субмикротрещины происходит эстафетная передача деформации от зерна к зерну под действием напряжений, компенсированных в объеме зерна, т. е. напряжений 2-го рода, а приложенная нагрузка и вес конструкции создают общий фон напряженного состояния, т. е. напряжения 1-го рода [2-4]. При этом необходимо отметить, что практически все разрушения ССМК происходят при нагрузках ниже расчетных и даже при их отсутствии под действием собственного веса конструкции и резком падении температуры. Кроме того, анализ разрушения показывает, что около 80 % всех разрушений происходит по околошовному участку ЗТВ. Протяженность околошовного участка составляет несколько рядов ряда крупных зерен и имеет резко выраженную структурную, механическую и химическую неоднородность по отношению ко всей протяженности ЗТВ. Другие участки ЗТВ также отличаются показателями механических и пластических свойств (σ_b , ударной вязкости и др.); наличием мягких и твердых прослоек, приводящих к градиенту концентрации напряжений, что также повышает склонность ССМК к хрупкому разрушению.

Несовершенство применявшихся ранее методов и методик исследования контактного взаимодействия на уровне зерна и недооценка роли контактного взаимодействия между зернами в твердом состоянии при термомеханическом воздействии не позволяло составить более полное и правильное представление о роли микронапряжений 2-го рода, приводящих к возникновению микропластической деформации зерна по механизму сдвига, что, в свою очередь, приводит к возникновению градиента концентрации напряжений на границе раздела фаз, мягкой и твердой прослоек сварного соединения [4-6].

Известно, что при заданных условиях нагружения степень развития пластической деформации в вершине растущей трещины зависит от динамических свойств дислокаций, в частности от интенсивности их размножения [1, 3, 5, 6]. Характеристикой последней служит время задержки текучести, которое в металлах с ОЦК-решеткой (все строительные малоуглеродистые и низколегированные стали) на 2-4 порядка больше, чем в металлах с ГЦК-решеткой (средне- и высоколегированные стали, никель, медь и др.). Это обстоятельство, наряду с указанными ранее, и обуславливают склонность металла сварного соединения ССМК к внезапному хрупкому разрушению.

Методы и материалы; результаты. Экспериментальные исследования кинетики развития физического контакта между материалами с резко различной сопротивляемостью ползучести в широком интервале температур и давлений с учетом изменения механических и упругих свойств металла, шероховатости и геометрии поверхности проводились с применением методики профилографирования и фрактографии фиксированного участка поверхности [7-9]. Исследования выполнялись на парах: корунд – металл (медь, никель, железоникелевый сплав Н50 и др.).

На основе полученных экспериментальных результатов комплексного исследования контактного взаимодействия разнородных материалов с резко различной сопротивляемостью пластической деформации кристаллических

материалов при термодетформационном воздействии установлены закономерности пластической деформации микронеровностей обработки и формирования контакта, изменения механических свойств на поверхности и приконтактном объеме, установлен уровень возникающих микронапряжений 2-го рода в объеме зерна и их роль в механо-физических процессах эстафетной передачи деформации из «мягкого» в «твердое» [4, 7].

Полученные результаты позволили объединить макроподходы физики и механики деформирования твердого тела через микронапряжения 2-го рода пластически деформирующего зерна с привлечением микроскопических представлений деформации кристаллической решетки (теории дислокаций) к объяснению механизма эстафетной передачи деформации в контакте и зарождения субмикротрещин в металле со сложной структурной составляющей (феррит + перлит ($\Phi + \text{Fe}_3\text{C}$)) [10].

Заключение. Таким образом, экспериментальные исследования и проведенные расчеты показывают, что под действием внешнего давления P , создающего напряжения 1-го рода, развивается макродеформация. Микропластическая деформация сдвигом зерен металла приводит к возникновению микронапряжений 2-го рода, локализованных в объеме зерна. Уровень этих напряжений на 1–2 порядка выше напряжений 1-го рода. Локальные напряжения в зерне обеспечивают перемещение дислокаций в полосе скольжения и их выход на поверхность в зону контакта с другим зерном, находящимся в состоянии физического контакта, с образованием деформационного микровыступа. Образующиеся ступеньки вызывают ответную реакцию в более твердом материале. Уровень этих напряжений в этих участках превышает на 1–2 порядка минимально необходимый уровень напряжений в более твердом материале и в последнем возникают полосы и пачки скольжения, т. е. происходит эстафетная передача деформации из зерна мягкого металла в зерно более твердого материала. Таким образом, можно говорить о возникновении «наведенной» пластической деформации в более «твердом» материале или «эстафетной» передаче деформации в более твердый материал под действием микронапряжений 2-го рода. Впервые предложен механизм эстафетной передачи деформации в контакте микровыступа «мягкого» металла с ответной поверхностью более «твердого» материала при термодетформационном воздействии на них, который объясняет концепцию физической мезомеханики, т. е. объединяет представления физики и механики деформирования сплошной среды (макроскопический подход) с микромеханикой деформирования кристаллической решетки (микроскопический подход), рассматриваемый с позиций теории дислокаций. Экспериментально-расчетным путем было установлено (для пластического контакта) соотношение K между нормальными и касательными микронапряжениями 2-го рода, равным 3,03, не меняющего свое значение в широком интервале температур и давлений, размера микровыступов и постоянство во времени.

Список источников

- [1] Алехин В.П. *Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов*. Москва, Наука, 1983, 280 с.
- [2] Абрамов В.В., Шоршоров М.Х., Алехин В.П. О механизме взаимодействия при сварке давлением с нагревом разнородных материалов. *Управление сварочными процессами: сб. тр.* Тула, ТПИ, 1980, с. 43–53.
- [3] Розенберг В. М. *Ползучесть металлов*. Москва, Металлургия, 1976, 276 с.
- [4] Абрамов В.В., Ракунов Ю.П., Жеглова Ю.Г. Роль микронапряжений второго рода в механико-физико-химических процессах схватывания разнородных кристаллических материалов при термомеханическом воздействии. *Инженерный журнал. Справочник*, 2025, № 5, с. 63–78.
- [5] Коттрел А. *Теория дислокаций*. Москва, Мир, 1969, 95 с.
- [6] Эшби И.Ф. О напряжении Орована. *Физика прочности и пластичности*. Москва, Металлургия, 1972, с. 88–107.
- [7] Абрамов В.В. Оценка формоизменения микровыступов и развития контакта между разнородными кристаллическими материалами при термомеханическом воздействии. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, 2025, № 2, с. 502–518. <https://doi.org/10.24412/2071616820252502503>
- [8] Абрамов В.В. Кинетика совмещенных процессов выглаживания и сварки давлением с нагревом разнородных кристаллических материалов с сильно различающейся сопротивляемостью пластической деформации. *Физика и химия обработки материалов*, 2024, № 2, с. 65–76. <https://doi.org/10.30791/0015-3214-2024-2-65-77>
- [9] Урусов Н.В., Бабашов И.В., Бондаренко Г.В., Абрамов В.В., Суденков Е.Г. *Способ уплотнения сапфировых окон*. Патент № 400488 СССР, 1973, 2 с.
- [10] Панин В.Е., Гриняев Ю.В. Физическая мезомеханика — новая парадигма на стыке физики и механики деформируемого твердого тела. *Физ. мезомех*, 2003, т. 6, № 4, с. 9–13.