

ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТЬ ОБОЛОЧЕК ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ АТОМНЫХ РЕАКТОРОВ

Д.Е. Кузнецов, В.С. Вахрушева, Е.Д. Кузнецов¹
Государственный трубный институт им. Я.Е. Осады;
¹ Институт развития, г. Днепрпетровск, Украина

Состояние поверхности является важным параметром, влияющим на эксплуатационный ресурс работоспособности твэлов. Из анализа данных опубликованных работ и патентов следует, что действующие в настоящее время методики не обеспечивают достоверную информацию об отклонениях поверхностей. Измерения профилей поперечных сечений труб, используемых в качестве оболочек, выявили наличие составляющих, которые могут стать причинами образования ускоренной коррозии и очагов локальной ползучести. Определены амплитудно-частотные характеристики отклонений, устранение которых позволит обеспечить более высокую гарантию взаимозаменяемости труб.

Повышение гарантий длительной работоспособности оболочек тепловыделяющих элементов остается актуальной проблемой для атомной энергетики. Над ее решением работают многие научные центры различных стран.

При анализе данных патентного ведомства США, проведенного с использованием ключевых слов «zircalou» и «fuel cladding», а также «zircalou» и «tubes», была выявлена следующая тенденция. В 1976-1980 годах зарегистрировано 98 патентов, в 1981-1985 годах – 123 патента, в 1986-1990 годах – 268 патентов, в 1991-1995 годах – 223 патента, в 1996 – 2002 годах – 152 патента. Наибольшее количество патентов принадлежит в США – Westinghouse Electric Corporation, General Electric Company, Siemens Power Corporation, Wilmington Facility; во Франции – Framatome, Compagnie Generale des Matiers Nucleaires, Compagnie Europee du Zirconium, Cezus; в Японии – Mitsubishi Materials Corporation, Mitsubishi Heavy Industries, Mitsubishi Nuclear Company, Hitachi; Швеции – ABB Atom AB, Sandvik AB.

Запатентованные технические решения в области повышения эксплуатационной надежности и длительной работоспособности оболочек тепловыделяющих элементов можно условно сгруппировать по следующим функциональным признакам. Наибольшее количество патентов имеет отношение к созданию новых сплавов циркония, обладающих, по мнению их авторов, более высокой коррозионной стойкостью и сопротивлением ползучести. Другое направление предусматривает разработку особых режимов термической обработки, обеспечивающих формирование специальной структуры циркониевого сплава, устойчивой к воздействию агрессивных сред. В значительной мере эти патенты связаны с созданием новых видов циркониевых сплавов. Зарегистрировано значительное количество патентов по технологии изготовления плакированных труб, где плакирующий слой наносится для защиты оболочки от коррозии.

В ряде патентов цель их сформулирована как повышение работоспособности оболочек тепловыделяющих элементов, обеспечение увеличения степени

выгорания ядерного топлива и сокращение количества перегрузок атомного реактора. Вместе с тем приходится констатировать, что до настоящего времени нет однозначного мнения о приоритетном пути решения этой проблемы.

Считают, что увеличение длительности эксплуатации тепловыделяющих элементов, изготовленных по действующей технологии из стандартных сплавов, ограничено из-за повышенной вероятности образования продольных трещин, приводящих к разгерметизации оболочек. Потенциальными причинами их возникновения называют ряд факторов, в том числе водородное охрупчивание, образование локальных очагов коррозии при воздействии газов, выделяющихся при ядерных реакциях, а также ползучесть оболочек вследствие возрастающего внутреннего давления и повышенных температур. Существует мнение, что работоспособность тепловыделяющего элемента во многом зависит от постоянства зазора между внутренней поверхностью оболочки и таблетками ядерного топлива. О различии подходов к решению проблемы длительной работоспособности оболочек можно судить по данным, приведенным в [1-5].

Отсутствие точного и однозначного представления о механизме разрушения оболочек затрудняет постановку задачи по разработке технологии изготовления оболочечных труб, способных обеспечить повышенные требования к длительной эксплуатации. Исходя из общих принципов обеспечения гарантированной безотказной работы в течение заданного интервала времени, применительно к технологии изготовления оболочки тепловыделяющего элемента требуется, как минимум, ввести термин «значительные дефекты», которые существенно влияют на работоспособность, но согласно действующей технической документации не являются критическими. Иными словами, необходимо выделить те показатели качества, которые могут обеспечить самую низкую вероятность разрушения в требуемом временном интервале. Перспективная технология должна обеспечить взаимозаменяемость труб по основным показателям качества и достоверное выявление

«значительных дефектов» для достаточно продолжительного временного интервала.

Как попытку решить подобного рода задачу можно рассматривать программу CANSWEL2, которую используют для моделирования деформации оболочки из сплава циркония при авариях с потерей теплоносителя. Эта программа использует ряд физических моделей для определения:

– напряжений в сплавах циркония с альфа и бета структурой в области фазовых превращений в интервале температур 600...1300 °С с учетом ранее прикладывавшихся нагрузок;

– двумерной деформации при неравномерности температуры и толщины стенки в поперечном сечении оболочки и ее перегрева при возникновении контакта с соседними тепловыделяющими элементами;

– вероятности разрушения оболочки;

– фазового превращения «альфа → бета» с учетом эффекта гистерезиса;

– окисления циркониевого сплава, его влияния на скорость ползучести и напряжение при разрушении и иных характеристик.

Достоверность такого моделирования зависит от исходных данных, используемых в этих моделях. Именно на этом этапе могут возникать существенные ошибки. Например, характер неравномерности толщины стенки труб, используемый в программе CANSWEL2 для оценки двумерной деформации оболочки, выглядит излишне идеализированным.

Это утверждение можно подтвердить результатами обширных исследований отклонений толщины стенки бесшовных труб, опубликованными в [6, 7].

Совсем недавно было распространено мнение, что повышение надежности работы твэлов требует введения 100% комплексного неразрушающего контроля труб с минимальным шагом сканирования поверхности. Как известно, его суть основана на сопоставлении уровня измерительного сигнала с заданными предельными значениями настроечных эталонов. При этом любое, даже минимальное, превышение этих уровней классифицируется как недопустимое. Трехмерный анализ отклонений толщины стенки, выполненный на оболочечных трубах из нержавеющей сталей, показал, что в пределах допускаемых отклонений толщины стенки могут существовать продольно ориентированные утонения, которые могут оказать отрицательное влияние на работоспособность оболочки [6]. Эти и другие результаты дают основание полагать, что применяемый в настоящее время размерный неразрушающий контроль не в состоянии гарантировать взаимозаменяемость оболочечных труб по размерным характеристикам.

Не вдаваясь в детали механизма развития трещин, априори можно утверждать, что значительную роль в их зарождении играет состояние поверхностей оболочки. В качестве обоснования такого утверждения сошлемся на многочисленные исследования в области электрохимии, свидетельствующие о том, что первоначальным этапом зарождения коррозии является абсорбция газов [8, 9]. Ее интенсив-

ность в значительной мере зависит от состояния поверхности. Установлено, что чем меньше микрорельеф, тем ниже склонность поверхности к воздействию газов и тем выше ее коррозионная стойкость [10].

Аналогичная ситуация сложилась и в области тепловой энергетики, где с каждым годом повышенную значимость приобретает проблема повышения ресурса работоспособности пароперегревательных, паропроводных и конденсаторных труб энергетических установок. Ресурс работоспособности и, главное, безопасность их работы при повышенных температурах и давлениях в значительной мере зависят от состояния поверхности.

Проблемным вопросом при производстве таких труб является образование узких, продольно ориентированных дефектов на внутренней поверхности, получивших название «седина». Механизм их образования до настоящего времени остается невыясненным, методы достоверной оценки отсутствуют.

НОРМАТИВЫ И МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОБОЛОЧЕЧНЫХ ТРУБ

Для обеспечения взаимозаменяемости труб большое значение приобретает нормирование показателей и методики оценки состояния поверхностей. Результаты исследований [11-13] показали, что в этой области имеется ряд противоречий, которые ставят под сомнение достоверность результатов оценки микрорельефа, производимой по методикам, оговоренным действующими стандартами.

Рассмотрим некоторые аспекты этой проблемы. Действующие стандарты и технические условия, относящиеся к качеству оболочечных труб, предусматривают проведение оценки состояния поверхностей с помощью щуповых профилографов. В стандарте B811-02 Standard Specification for Wrought Zirconium Alloy Seamless Tubes for Nuclear Reactor Fuel Cladding приведена ссылка, согласно которой шероховатость внутренней и наружной поверхностей определяется стандартом ANSI B 46.1 либо его национальным или международным аналогом в соответствии с требованиями заказчика по данному параметру.

В патенте США 6 524 169 отмечается, что оболочечные трубы из циркониевых сплавов, изготавливаемые по стандартной технологии, поставляются с микрорельефом поверхности с показателем Ra в пределах 0,3...0,5 мкм. В этом патенте предложена технология изготовления труб с показателем Ra < 0,25 мкм.

В технических условиях ТУ 95 2594-96 на трубы из циркониевого сплава марки Э110 указывается, что «параметр шероховатости (Ra)» наружной поверхности должен быть не более 1 мкм, внутренней – не более 1,5 мкм. Измерение шероховатости предписано производить по инструкции 4 - 4549И.

В технических условиях ТУ У27.1-8-53-2001 на опытную партию бесшовных холоднодеформированных труб из циркониевого сплава Zr1Nb указывается, что трубы должны поставляться с химически травленной наружной и внутренней поверхностями.

Там же, в разделе «Методы испытаний», отмечается, что осмотр наружной поверхности труб проводят визуально методом сравнения с утвержденными «образцами», а осмотр их внутренней поверхности – визуально на фоне светлого экрана или на «лампочку».

Не касаясь различия нормируемого показателя Ra, что, по-видимому, связано с техническими возможностями изготовителей труб, отметим принципиальное противоречие сложившейся практики с требованиями стандарта ANSI B 46.1. Последний из них предусматривает, что при оценке состояния поверхности трасса измерения должна проходить под углом 90° к направлению основных отклонений поверхности. К каким результатам может приводить традиционная оценка микрорельефа, основанная на сканировании поверхностей в продольном направлении труб, можно судить по растровому изображению внутренней поверхности холоднокатаной трубы из стали марки X18H10T (рис. 1). Приходится утверждать, что, производя измерения вдоль образующей оболочки, оценку состояния поверхностей осуществляют по продольно ориентированным вершинам или впадинам и получают искаженные результаты, не отражающие ее реальную структуру.

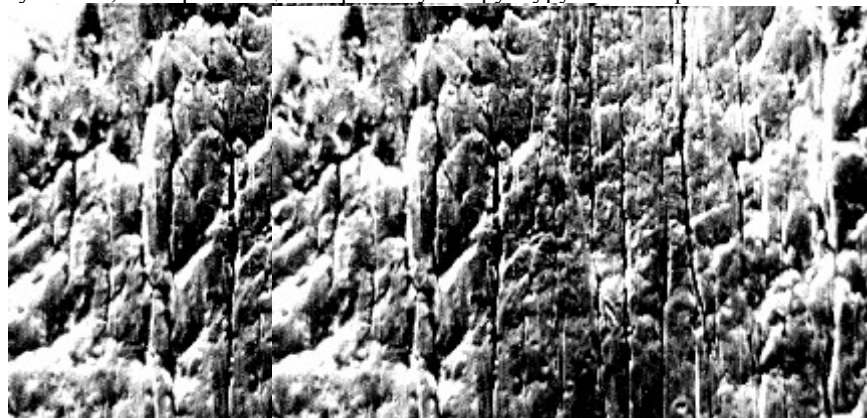


Рис. 1. Растровое изображение внутренней поверхности холоднокатаной трубы марки X18H10T Ø48 ×5¹ мм, ×500

На основании анализа состояния поверхностей холоднокатаных труб, изготовленных из различных материалов, установлено, что для них характерна отчетливо проявляемая продольная ориентация [8]. Такая закономерность определяется деформационными условиями процесса холодной прокатки труб.

Принципиальным вопросом, возникающим при оценке поверхностей, подвергнутых пластической деформации с помощью шуповых приборов, является выбор оцениваемого параметра. Широко используемые характеристики Ra и, даже Rz, не всегда приемлемы по ряду обстоятельств, в первую очередь из-за того, что с их помощью практически не-

¹ Здесь и далее по тексту, где не отмечено особо, размер труб – внешний диаметр труб, умноженный на толщину стенки.

возможно оценить функциональные характеристики поверхностей. Это обстоятельство нашло отражение во многих литературных источниках и послужило причиной расширения возможностей приборов.

В начале 80-х годов появились профилографы, позволяющие оценивать поверхность по 15 параметрам. К концу 90-х количество таких параметров превысило 40. Отмеченная тенденция продолжается и до настоящего времени. Например, фирма Taylor Hobson, занимающая лидирующее положение в области изготовления приборов, предназначенных для оценки состояния поверхностей, сравнительно недавно выпустила в продажу новейшую модель профилографа, с помощью которого возможна оценка следующих параметров:

- амплитудные параметры отклонений поверхности в вертикальном направлении: Rz, Rz и Rtm, R3y, R3z;

- пространственные параметры отклонений поверхности в горизонтальном направлении: RSm, WSm, PSm;

- гибридные параметры: Rdq, Wdq, Pdq, RLaq, WLaq, PLaq, представляющие собой сочетание характеристик отклонений поверхности в вертикальном и горизонтальном направлениях.

истов бытует шутливое выражение: «Профилографы по количеству параметров напоминают кабину пилота реактивного самолета». Состоит лишь в том, что пилоты должны постоянно включать и выключать, а польза от этого понятна, как ими воспользоваться, так ими нужны.

Вопрос о достоверности оценки экспонентов поверхностей с помощью профилографов свидетельствует о том, что до сих пор эта тема еще остается в стадии

ОСОБЕННОСТИ ОТКЛОНЕНИЙ В ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЯХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ХОЛДНОКАТАНЫХ ТРУБ

Исследование закономерностей отклонений поверхности оболочечных труб, выполненное по методике, описанной в [11, 12] с использованием измерений в поперечном сечении, позволило установить ряд новых закономерностей.

В частности, установлено, что внутренняя поверхность холоднокатаных труб отличается нестационарным характером отклонений. Типовой характер профилей поперечных сечений в полярной системе координат показан на рис. 2. Принципиальное отличие профилей поперечных сечений внутренней поверхности холоднокатаных труб состоит в том, что они содержат повышенную случайную компоненту, а периодические составляющие находятся в более широком частотном диапазоне по сравнению с поверхностями, подвергнутыми механической обработке. При анализе такого рода отклонений следует учитывать отличие механизма формирования поверхностей, подвергнутых пластической деформации. При механической обработке поверхность фор-

мируется путем взаимодействия обрабатываемого металла с режущим инструментом и содержит регулярные периодические составляющие с относительно стационарной амплитудой. На их основе регламентируют длину трассы измерения, шаг отсечки,

характеристики фильтров и иные параметры настройки измерительных приборов. Если эти обстоятельства не будут приняты во внимание, неизбежно возникнут существенные погрешности.

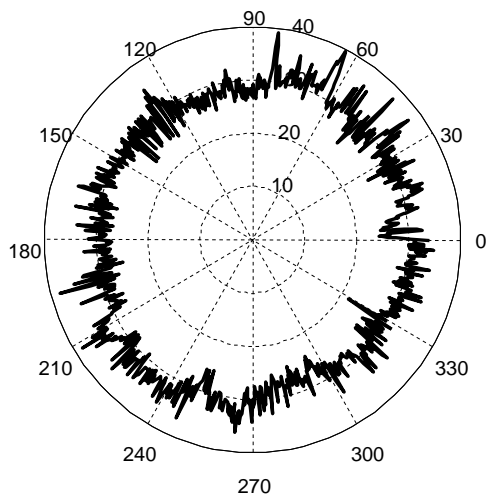


Рис. 2. Профиль поперечного сечения внутренней поверхности холоднокатаной трубы из сплава Zr1Nb $\varnothing 35 \times 5$ мм

На основе проведенного амплитудно-частотного анализа профилей поперечных сечений холоднокатаных труб предложена следующая классификация отклонений: макроотклонения; низкочастотные составляющие с длиной периода в пределах $0,18 \dots 0,4$ длины периметра; микроотклонения – высокочастотные составляющие с длиной периода в пределах $0,001 \dots 0,005$ мм.

Определение их основано на проектировании цифровых фильтров и последующей фильтрации результатов измерений профиля соответствующего поперечного сечения, а также использования алгоритма, в основу которого положены принципы вейвлет анализа.

На рис. 3 приведены макро- и микроотклонения профиля поперечного сечения на внутренней поверхности трубы из сплава Zr1Nb с внешним диаметром 17 мм и толщиной стенки 1,9 мм.

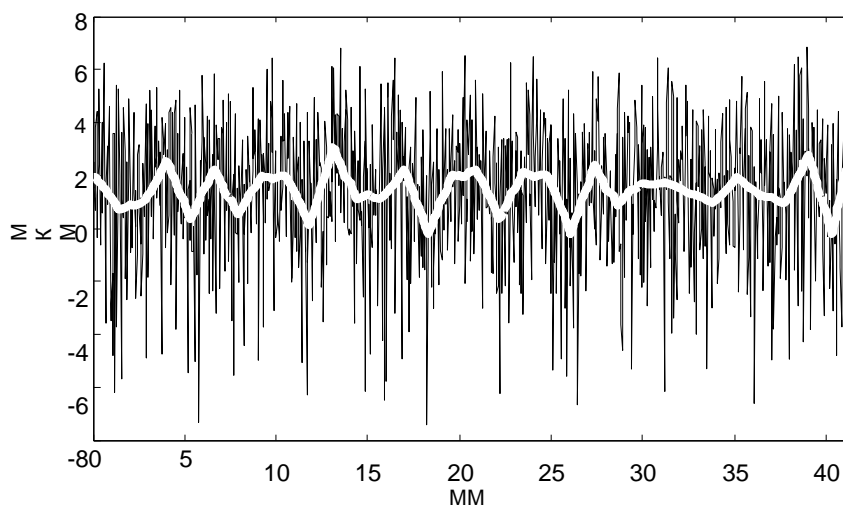


Рис. 3. Макро- и микросоставляющие профиля поперечного сечения внутренней поверхности холоднокатаной трубы из сплава Zr1Nb $\varnothing 17 \times 1,9$ мм. Темные линии – микроотклонения, светлая кривая – макроотклонения

Трехмерный анализ внутренней поверхности труб, выполненный путем измерений профилей в последовательности поперечных сечений, показал, что для холоднокатаных труб характерна продольная ориентация этих составляющих. На рис. 4 приведено контурное изображение структуры внутрен-

ней поверхности трубы из сплава Zr1Nb $\varnothing 9,1 \times 0,7$ мм, построенного путем последовательных измерений профилей поперечных сечений в продольном направлении с шагом 0,5 мм и с дискретизацией в поперечном направлении, равной 0,01 мм.

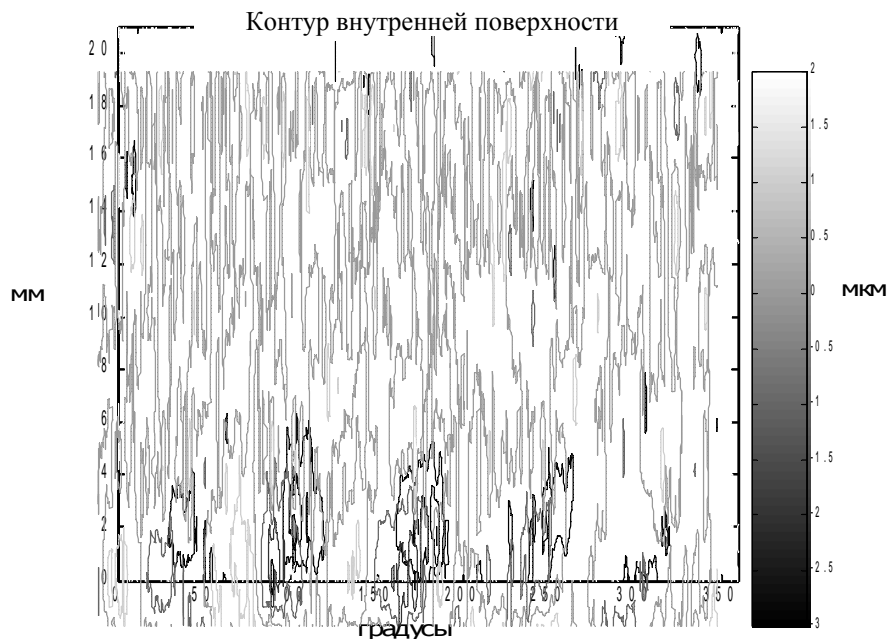
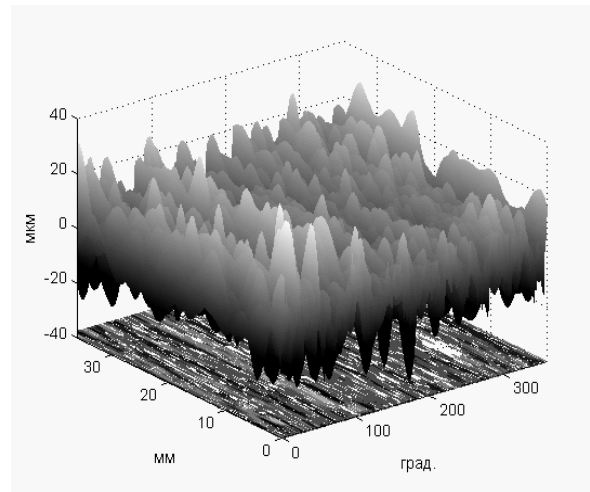
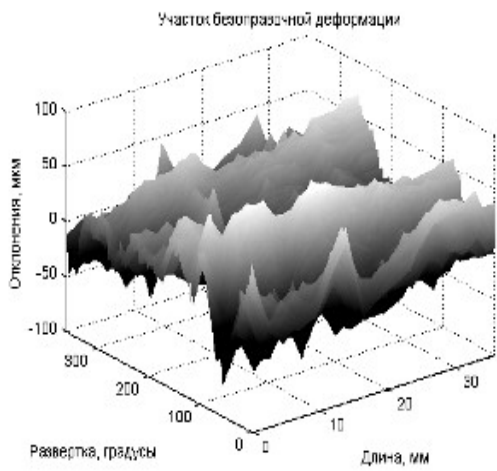
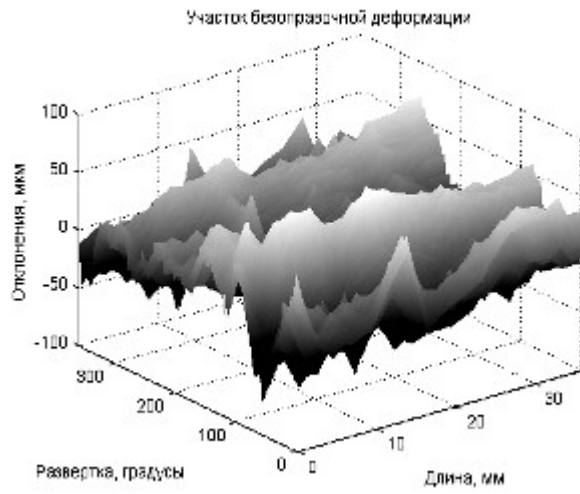


Рис. 4. Контурные отклонения внутренней поверхности трубы из сплава Zr1Nb $\varnothing 9,1 \times 0,7$ мм

Пространственная структура макроотклонений дает основание полагать, что при определенных условиях они могут стать концентраторами напряжений, оказывать отрицательное влияние на прочностные характеристики оболочки и способствовать повышению абсорбции газов, ускоряющей образование локальных очагов коррозии.

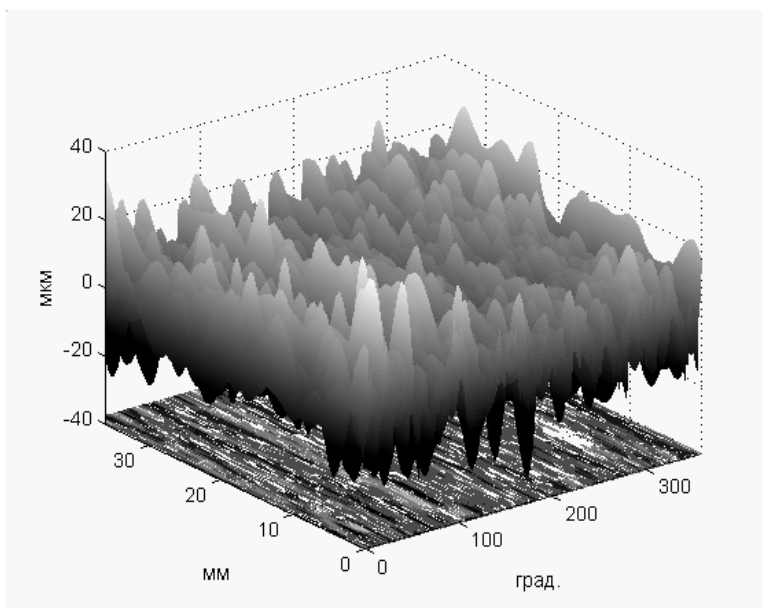
Макро- и микросоставляющие отклонений поверхности зарождаются и развиваются в процессе холодной прокатки, о чем можно судить по рельефу поверхности, показанному на рис. 5, а, б.



а

б

Рис. 5. Формирование внутренней поверхности трубы из сплава $Zr1Nb$ на участке безправной деформации при промаршруте $\varnothing 46 \times 6$ мм
 а – макроотклонения;
 б – микроот-



ирование отклонений поверхности трубы $Zr1Nb$ на участке безправной деформации при промаршруте $\varnothing 46 \times 6$ мм
 а – макроотклонения;
 б – микроот-

Трехмерный анализ отклонений поверхности по длине очага деформации холодной прокатки выявил закономерности, позволяющие сформулировать требования к построению технологии изготовления труб повышенного качества. Суть ее заключается в

том, что в процессе прокатки микроотклонения образуются по всей длине очага деформации, включая обжимной и калибрующий участки. Эта закономерность иллюстрируется графиком, приведенным на рис. 6.

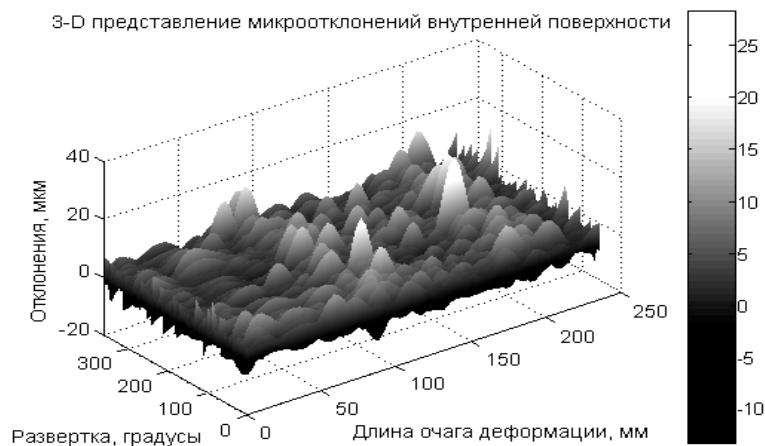
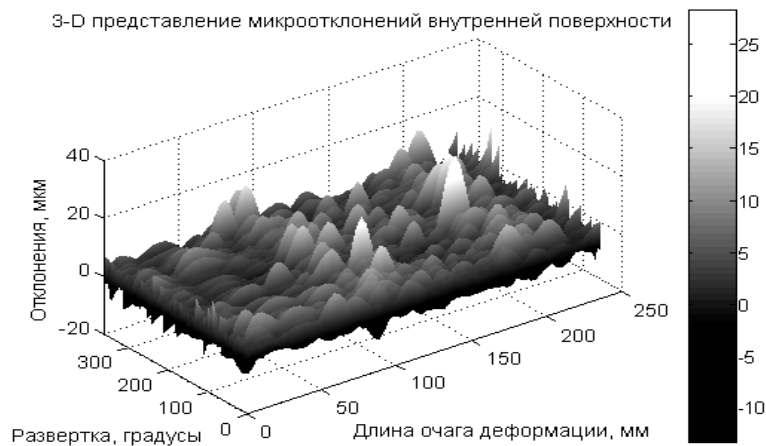


Рис. 6. Микроотклонения внутренней поверхности на обжимном и калибрующем участках при прокатке по маршруту $\varnothing 35 \times 5 \text{ мм} \rightarrow \varnothing 25 \times 2,8 \text{ мм}$; сплав $Zr1Nb$

на уровне 0; +0,06 мм. Для современного состояния трубного производства обеспечение таких требований не представ-

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОСТОЯНСТВА ЗАЗОРА МЕЖДУ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ОБОЛОЧКИ ТВЭЛА И ДИАМЕТРОМ ТОПЛИВНОЙ ТАБЛЕТКИ

В ряде публикаций отмечается актуальность обеспечения гарантированного зазора между внутренней поверхностью оболочки и топливной таблеткой. Следуя эксплуатационной схеме, для повышения работоспособности твэла следует обеспечить стабильность зазора. Решение такой задачи можно рассматривать как аналог известной в механике задачи о сопряжении отверстия и вала. Для ее решения должны быть известны как минимум следующие исходные данные: допускаемые отклонения на диаметр таблетки, допускаемые отклонения на точность внутреннего диаметра оболочки и, естественно, требуемый зазор.

Не касаясь возможности определения первых двух показателей, отметим, что в стандартах на оболочечные трубы установлены довольно широкие требования к точности внутреннего диаметра. Наиболее жесткими являются предельные отклонения

являет особых сложностей. С помощью соответствующих технологических приемов это поле допуска может быть уменьшено минимум в два раза. Однако серьезные замечания следует высказать по поводу нормирования внутреннего диаметра оболочечных труб и методики контроля этого показателя. Существо погрешностей и противоречий, возникающих при использовании установок неразрушающего контроля, рассмотрено в [6]. При повышении требований к достоверности размерного контроля внутреннего диаметра оболочечных труб потребуется ввести коррективы в нормирование показателя точности и методик контроля, в том числе должны быть сформулированы повышенные требования к точности внутреннего диаметра, допустимым отклонениям от круглости и определены методики их контроля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для решения проблемы увеличения длительности надежной и безопасной эксплуатации тепловыделяющих элементов необходимо повысить требо-

вания к оболочечным трубам по размерным характеристикам. К перечню «значительных дефектов», определяющих гарантированную безопасность длительной эксплуатации оболочек, относится состояние ее внутренней поверхности. На основе измерений профилей поперечных сечений труб выявлены макро- и микросоставляющие, которые могут стать потенциальными источниками зарождения очагов разрушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Garde; M. Anand. Zirconium alloy with tin, nitrogen, and niobium additions. *US patent № 5 366 690*. Date of patent: Nov. 16, 1997.
2. Dale Fraderick Talor. Corrosion resistant zirconium alloy for extended-life fuel cladding. *US patent № 5 699 396*. Date of patent: Dec. 22, 1994.
3. Fujieda, Tadashi, Inagaki, Takase, Iwao, Nakajama, Jnujiro, Asano, Rinichi, Seto, Takehiro. Zirconium based alloy of low irradiation growth, method of producing the same, and use the same. *US patent № 5 862 194*. Date of patent: Jun. 19, 1999.
4. Ronald Bert Adamson, Daniel Reese Lutz, Mickey Oville Marlow, John Frederick Schardt, Cedric David Williams. Cladding for use in nuclear resistance to stress corrosion cracking and corrosion. *US patent № US 2001/0007584 A1*. Date of patent: Jul. 12, 2001.
5. B. Cox. Mechanisms of zirconium alloy corrosion in nuclear reactors // *The journal of corrosion science and engineering*. 2003, v. 6, p. 14.

6. Е.Д. Кузнецов. О достоверности размерного неразрушающего контроля бесшовных труб // *Дефектоскопия*. 1987, № 5, с. 56–60.

7. Е.Д. Кузнецов, Д.Е. Кузнецов. Проблема обеспечения точности размеров и качества поверхности при производстве труб // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2000, №5, с. 336 – 339.

8. В.В. Стендлер. *Прикладная электрохимия*. Харьков: Издательство ХГУ, 1961, с. 531.

9. *Прикладная электрохимия* / Под ред. д.т.н. А.П. Томилова. М.: «Химия», 1984, с. 516.

10. А.М. Сулима, В.П. Шумов, Ю.Д. Ягодкин. *Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин*. М.: «Машиностроение», 1988, с. 239.

11. Д.Е. Кузнецов, В.С. Вахрушева, Е.Д. Кузнецов. Алгоритм оценки состояния поверхностей прецизионных труб // *Материалы III Международной научно-практической конференции по проблемам совершенствования производства и эксплуатации трубной продукции «Трубокон-2000»*, Днепропетровск, 2002, с. 98–103.

12. Д.Е. Кузнецов. Методические особенности исследования размерных характеристик внутренней поверхности труб // *Наукові вісті. Сучасні проблеми металургії*. Т. 8. *Пластична деформація металів*. Днепропетровськ, 2005, с. 456–460.

13. Д.Е. Кузнецов, Е.Д. Кузнецов. Исследование размерной структуры профилей поперечных сечений бесшовных труб // *Там же*. С. 432–436.

ВЗАЄМОЗАМІННІСТЬ ОБОЛОНОК ТЕПЛОВІДЛІЯЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ АТОМНИХ РЕАКТОРІВ

Д.Е. Кузнецов, В.С. Вахрушева, Е.Д. Кузнецов

Стан поверхні є важливим параметром, що впливає на експлуатаційну довговічність тепловідляючих елементів. Патентний і літературний аналіз дає підставу зробити висновок, що діючі в цей час методики оцінки поверхні не забезпечують достовірну інформацію про відхилення поверхні. Виміру профілів поперечних перерізів труб, використовуваних як оболонки, виявили наявність складових, які можуть стати причинами утворення прискореної корозії й повзучості. Визначено амплітудно-частотні характеристики відхилень, усунення яких забезпечить підвищення взаємозамінності труб.

INTERCHANGEABILITY OF FUEL CLADDING OF NUCLEAR REACTORS

D.E. Kusnetsov, V.S. Vakhrusheva, E.D. Kusnetsov

The condition of a surface is the important parameter influencing operational durability of fuel cladding. The patent and literary analysis gives the basis to draw a conclusion, that techniques of an estimation of a surface working now do not provide an authentic estimation of condition of a surface. Measurements of structures of cross sections of the zircaloy tubes have revealed presence of components which can become the reasons of formation of the accelerated corrosion and the centers of creep. Amplitude-frequency characteristics of deviations of surfaces were determined which elimination can provide increase of interchangeability of tubes.

