

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 620.1

Л.Т. Крюков, М.И. Ершова

### КОНТРОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ РЕАКТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПО ПАРАМЕТРАМ МИКРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Показано, что результаты исследования параметров микропластической деформации могут быть успешно применены для решения задач контроля механических свойств материалов реакторного оборудования. Экспериментально установлено, что параметр микропластической деформации, характеризующий протяженность микропластической области и интенсивность релаксации в ней напряжений, линейно связан с коэффициентом ударной вязкости и является более чувствительным индикатором охрупчивания, чем ударная вязкость. Обосновывается, что параметры микропластической деформации более корректно использовать в качестве индикатора различного вида охрупчивания сталей.

*Ключевые слова:* параметры микропластической деформации, ударная вязкость, охрупчивание сталей.

Одной из важных задач при эксплуатации конструкций атомного машиностроения является обеспечение контроля механических свойств конструкционных сталей. В зависимости от конкретных условий работы, контроль механических свойств материалов может осуществляться путем использования неразрушающего метода, вырезки части конструкций для изготовления образцов и проведения механических испытаний, а также путем использования образцов-свидетелей. Для целей контроля механических свойств материалов предлагается использование характеристик микропластической деформации [1]. Со спецификой протекания микроскопической деформации связаны многие особенности поведения материалов и их эксплуатационные свойства. Микропластическая деформация в значительной мере определяет такие явления, как упругое последствие, релаксация напряжений, внутреннее трение, характеристики усталости и ползучести, склонность материалов к хрупкому разрушению и другие [2]. Следует особо отметить проблемы контроля за состоянием материалов реакторного оборудования, как в силу специфики эксплуатации материалов, так и из-за необходимости получения данных, отличающихся более высокой достоверностью. Известно, что процесс радиационного повреждения материалов реакторного оборудования зависит от большого количества факторов, связанных с химическим составом стали, особенностями ее термической и механической обработок, параметрами облучения, комбинированным влиянием облучения и среды и т.п. Это делает актуальным проблему изучения и прогнозирования поведения конкретных материалов, их сварных швов в штатных условиях эксплуатации различных частей конструкций реакторов. Для этих целей используются образцы-свидетели, которые должны быть не только размещены максимально близко к определенной части конструкции, но и иметь минимально возможные размеры ( $\varnothing$  3,5 мм, высота 7 мм). В то же время методики испытаний этих образцов-свидетелей должны обладать максимальной точностью и информативностью, чтобы в результате испытаний малого количества образцов получить достоверные результаты об изменении комплекса механических характеристик. К таковым относятся характеристики прочности: ударной вязкости, вязкости разрушения, критических температур вязко-хрупкого перехода, малоциклового усталости. Все перечисленное дает представление о сложности проблемы контроля материалов реакторного оборудования,

для решения которой ведутся работы в развитых странах с различными подходами, но общей остается одна тенденция: уменьшение размеров образцов и повышение информативности методов испытаний.

Для оценки пределов пропорциональности (упругости), текучести, ударной вязкости и критических температур вязко-хрупкого перехода в сталях по параметрам микропластической деформации (ПМД) предлагается использовать методику, разработанную для испытания образцов металлических материалов при ступенчатом (прерывистом) увеличении прикладываемой нагрузки [1]. Сущность методики заключается в регистрации функции отклика (в данном случае – кривой релаксации напряжений) при приращении нагрузки на образец на постоянную величину через равные промежутки времени. На первом этапе работ, определяющем границы применимости методики, в качестве параметра реакции материала на нагрузку используется простейшая характеристика – величина падения напряжения  $\Delta\sigma$ . Эта величина качественно характеризует интегральное влияние различных факторов торможения движущихся дислокаций на каждом этапе микропластической деформации. Этапы (стадии) микропластической деформации ограничены критическими напряжениями  $\sigma_1^\circ$ ,  $\sigma_2^\circ$ ,  $\sigma_1'$ ,  $\sigma_2'$  и  $\sigma''$ , при которых реализуются новые механизмы пластической деформации, дополнительно к действующим при более низких напряжениях. Этим критическим напряжениям соответствуют определенные величины релаксации напряжений  $\Delta\sigma_1^\circ$ ,  $\Delta\sigma_2^\circ$ ,  $\Delta\sigma_1'$ ,  $\Delta\sigma_2'$  и  $\Delta\sigma''$  [1].

Критические напряжения  $\sigma_2^\circ$  и  $\sigma''$  находятся в удовлетворительной линейной корреляции соответственно с условными пределами упругости и текучести, но в отличие от последних имеют определенный физический смысл. Поэтому изменение структуры материалов при воздействии на них различных факторов можно оценить по параметрам  $\sigma_2^\circ$  и  $\sigma''$  более корректно, чем, например, по значениям  $\sigma_y$  (условного напряжения, при котором достигается заданная величина остаточной деформации – 0,05; 0, 02; 0,001 и 0,005 %) и  $\sigma_{0,2}$  (условного предела текучести рассматриваемых материалов). Критическое напряжение  $\sigma_2^\circ$ , обозначающее окончание микропластической области деформации и соответствующее  $\sigma_y$ , совместно с параметром  $\Delta\sigma_2^\circ$  характеризует макроупругие свойства материала, определяя верхнюю границу ( $\sigma_2^\circ$ ) области минимальных необратимых пластических деформаций и их интенсивность ( $\Delta\sigma_2^\circ$ ). Кроме того, используя эти параметры, можно оценить изменение ударной вязкости металлических материалов. По параметрам микропластической деформации также можно определять температуры вязко-хрупкого перехода в сталях.

В настоящее время для оценки склонности материалов к хрупкому разрушению широкое распространение получили испытания на ударную вязкость: это связано с тем, что данная характеристика в большинстве случаев более резко реагирует на изменение структуры, чем пределы упругости и текучести. Однако следует обратить внимание, что величина ударной вязкости по своей сути является условной характеристикой, зависящей от условий испытаний и типа образцов. Например, для оценки склонности сталей к хрупкому разрушению увеличивают скорость нагружения (динамические испытания на изгиб), повышают «жесткость» напряженного состояния образца (различные типы надрезов создают состояние трехслойного растяжения), снижают температуру испытания. Следует отметить, что при испытаниях разные типы образцов одного и того же материала дают разные значения ударной вязкости, определяемой отношением затраченной работы к сечению образца в месте надреза, что обусловлено деформацией образца не в плоскости, а в некотором объеме материала, определить который не представляется возможным. Поэтому вычисление характеристики ударной вязкости не имеет физического смысла.

Хрупкое разрушение материалов, не сопровождающееся значительной пластической деформацией, происходит в упругой (макро) области, в которой имеется два пути релаксации возникающих максимальных локальных напряжений – релаксация напряжений за счет протекания микропластической деформации и за счет нарушения сплошности материала (образования трещин). В связи с этим было замечено, что снижение релаксационной стойкости материала при нагрузках ниже предела текучести сопровождается его охрупчиванием. Необ-

ходимо отметить, что попытки оценить количественно охрупчивание сталей по изменению только релаксационного параметра или только пределов текучести и прочности не дали положительных результатов, удовлетворяющих потребности практики. Исследование различных видов охрупчивания сталей, связанных с развитием обратимой и необратимой отпускной хрупкости, и др., показало, что эти процессы неизбежно ведут к изменению характера микропластической деформации и, соответственно, к изменению ПМД (параметров микропластической деформации). При этом при охрупчивании сталей, выявляются некоторые закономерности в изменениях параметров  $\sigma_2^\circ$  и  $\Delta\sigma_2^\circ$ .

При всех видах охрупчивания сталей наиболее характерным является повышение параметра  $\sigma_2^\circ$  или снижение величины  $\Delta\sigma_2^\circ$ . Охрупчивание может сопровождаться изменением в указанном направлении одного из этих параметров или обоих, причем между значениями каждого из этих параметров и величиной ударной вязкости нет взаимосвязи. Однако вполне удовлетворительная корреляция обнаруживается между ударной вязкостью и параметром  $A$ ,

включающим значения  $\Delta\sigma_2^\circ$  и  $\sigma_2^\circ$ , который выражается как  $A = \frac{(\Delta\sigma_2^\circ)^2}{\sigma_2^\circ}$ . Результаты определения значений КСУ (ударной вязкости) в МДж/м<sup>2</sup> (X) и  $A \cdot 10^2$  в МПа (Y) приведены в табл. 1 для различных сталей и двух титановых сплавов после различных режимов термического упрочнения. В этой таблице сталь 18Х2Н4МА представлена в четырех состояниях: А, Б, В и Г. Состояние «А» – горячая деформация + улучшение + закалка с различными температурами отпуска; состояние Б – литье + улучшение + закалка с отпуском; состояние В – литье + циклическая гомогенизация при 1050 °С + улучшение + закалка с отпуском; состояние Г – тоже, что и В, но гомонизация при 1250 °С.

Как видно из табл. 1, общей зависимости КСУ-А для всех материалов нет, для каждой марки получена своя индивидуальная линейная зависимость КСУ-А, характеризующаяся высокими значениями коэффициентов корреляции, при этом выявляется тенденция к возрастанию коэффициента «К» в линейном уравнении при увеличении содержания углерода в стали, соответственно увеличению ее прочности. На рис. 1 в качестве примера приведены зависимости КСУ-А для инструментальной стали У10 и конструкционной стали 30ХГСА, закаленных и отпущенных в интервале температур 200-650 °С. Большой угол наклона зависимости КСУ-А для стали У10 показывает, что в то время как для высокоуглеродистой и высокопрочной стали испытания на ударную вязкость становятся непоказательными, параметр  $A$  регистрирует существенное изменение вязких свойств стали с изменением ее структуры в зависимости от температуры отпуска.

Таким образом, можно заключить, что ПМД целесообразно использовать в качестве индикатора охрупчивания различного вида сталей, оценивая, в частности, изменение простейшего параметра  $A = \frac{(\Delta\sigma_2^\circ)^2}{\sigma_2^\circ}$ . Этот параметр по своей сути характеризует протяженность микропластической области и интенсивность релаксаций в ней напряжений. До

напряжения  $\sigma_2^\circ$  возможность релаксации напряжения весьма ограничена, а в интервале  $\sigma_2^\circ - \sigma''$  эта возможность непрерывно возрастает, а выше  $\sigma''$  – резко возрастает, исключая саму возможность хрупкого разрушения материала. Очевидно, что при равных условиях нагружения одинаковых образцов сталей, вероятность хрупкого разрушения будет тем выше, чем больше протяженность микропластической области и меньше интенсивность релаксации в ней. В этом смысле параметр  $A$  характеризует некоторый запас вязкости материала (склонность его к хрупкому разрушению), определенный при очень малых деформациях и не зависящий от конкретно реализуемого способа разрушения материала.

Таблица 1

Значения ударной вязкости (X) и параметра А (Y) для сталей и титановых сплавов

| Марка стали      | Параметры | Значения ударной вязкости (X) и параметра А (Y) |      |      |      |      |      |      |      |      |      | Уравнение регрессии       | Коэффициент корреляции «r» |
|------------------|-----------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---------------------------|----------------------------|
|                  |           | X   | Y    | X    | Y    | X    | Y    | X    | Y    | X    | Y    |                           |                            |
| 45               | X         | 0,25  | 0,17 | 0,27 | 0,31 | 0,49 | 0,61 | 0,73 | 0,85 | 1,11 | 1,41 | Y<br>= 0,51<br>+ 0,91 · X | 0,96                       |
|                  | Y         | 0,88  | 0,76 | 0,53 | 0,75 | 0,87 | 1,02 | 1,11 | 1,41 | 1,46 | 1,79 |                           |                            |
| У8               | X         | 0,17  | 0,27 | 0,24 | 0,36 | 0,37 | 0,30 | 0,41 | 0,55 | 0,56 | -    | Y<br>= 0,71<br>+ 4,11 · X | 0,94                       |
|                  | Y         | 0,47  | 0,67 | 0,52 | 0,68 | 0,82 | 1,03 | 0,99 | 1,18 | 1,58 | -    |                           |                            |
| У10              | X         | 0,22  | 0,30 | 0,28 | 0,27 | 0,30 | 0,37 | 0,44 | 0,46 | 0,55 | 0,62 | Y<br>= 0,44<br>+ 3,55 · X | 0,98                       |
|                  | Y         | 0,40  | 0,40 | 0,50 | 0,56 | 0,74 | 0,87 | 1,08 | 1,25 | 1,59 | 1,70 |                           |                            |
| 30ХГСА           | X         | 0,56  | 0,55 | 0,45 | 0,47 | 0,65 | 0,79 | 0,72 | 0,77 | 1,77 | 1,80 | Y<br>= 0,17<br>+ 0,27 · X | 0,95                       |
|                  | Y         | 0,32  | 0,25 | 0,28 | 0,30 | 0,43 | 0,42 | 0,32 | 0,64 | 0,64 | 0,65 |                           |                            |
| 40X              | X         | 1,02  | 1,15 | 1,06 | 0,82 | 0,95 | 1,24 | 1,18 | 1,13 | 1,40 | -    | Y<br>= 0,66<br>+ 0,99 · X | 0,69                       |
|                  | Y         | 0,24  | 0,35 | 0,31 | 0,27 | 0,28 | 0,40 | 0,35 | 0,78 | 0,90 | -    |                           |                            |
| 15X2HM<br>А      | X         | 0,74  | 0,73 | 0,74 | 0,82 | 0,82 | 0,93 | 1,05 | 1,77 | -    | -    | Y<br>= 3,67<br>+ 1,56 · X | 0,71                       |
|                  | Y         | 0,91  | 0,97 | 0,97 | 0,98 | 0,98 | 1,06 | 1,04 | 1,60 | -    | -    |                           |                            |
| 5ХНТ             | X         | 0,16  | 0,27 | 0,39 | 0,41 | 0,54 | 0,75 | 0,92 | 0,77 | -    | -    | Y<br>= 0,13<br>+ 0,5 · X  | 0,92                       |
|                  | Y         | 0,24  | 0,35 | 0,27 | 0,30 | 0,37 | 0,50 | 0,68 | 0,47 | -    | -    |                           |                            |
| 18X2H4M<br>А (А) | X         | 1,35  | 1,26 | 0,62 | 0,43 | 0,35 | 0,52 | 1,77 | 1,79 | -    | -    | Y<br>= 0,87<br>+ 0,23 · X | 0,82                       |
|                  | Y         | 1,28  | 1,05 | 0,98 | 0,90 | 0,96 | 1,11 | 1,17 | 1,41 | -    | -    |                           |                            |
| 18X2H4M<br>А (Б) | X         | 1,28  | 1,06 | 1,02 | 0,79 | 0,86 | 1,11 | 1,38 | 1,72 | -    | -    | Y<br>= 0,2<br>+ 0,65 · X  | 0,96                       |
|                  | Y         | 1,08  | 0,96 | 0,91 | 0,66 | 0,77 | 0,87 | 1,03 | 1,33 | -    | -    |                           |                            |
| 18X2H4M<br>А (В) | X         | 1,21  | 0,82 | 0,84 | 0,73 | 0,81 | 0,97 | 1,19 | 1,58 | -    | -    | Y<br>= 0,33<br>+ 0,75 · X | 0,95                       |
|                  | Y         | 1,36  | 1,00 | 0,93 | 0,89 | 0,89 | 0,95 | 1,27 | 1,45 | -    | -    |                           |                            |
| 18X2H4M<br>А (Г) | X         | 1,10  | 0,90 | 0,85 | 0,78 | 0,82 | 1,11 | 1,37 | 1,66 | -    | -    | Y<br>= 0,26<br>+ 0,56 · X | 0,95                       |
|                  | Y         | 0,81  | 0,73 | 0,81 | 0,74 | 0,69 | 0,91 | 0,97 | 1,25 | -    | -    |                           |                            |
| X19H2Г5<br>Т     | X         | 0,20  | 0,20 | 0,36 | 1,60 | 1,80 | -    | -    | -    | -    | -    | Y<br>= 0,97<br>+ 0,46 · X | 0,90                       |
|                  | Y         | 1,20  | 0,80 | 1,24 | 1,83 | 1,67 | -    | -    | -    | -    | -    |                           |                            |
| BT3-1            | X         | 0,48  | 0,21 | 0,17 | 0,18 | 0,18 | 0,25 | -    | -    | -    | -    | Y<br>= 0,55<br>+ 1,4 · X  | 0,98                       |
|                  | Y         | 1,21  | 0,87 | 0,78 | 0,75 | 0,75 | 0,92 | -    | -    | -    | -    |                           |                            |
| BT22             | X         | 0,32  | 0,17 | 0,22 | 0,28 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | Y<br>= 2,23 · X           | 0,99                       |
|                  | Y         | 0,71  | 0,38 | 0,49 | 0,63 | -    | -    | -    | -    | -    | -    |                           |                            |

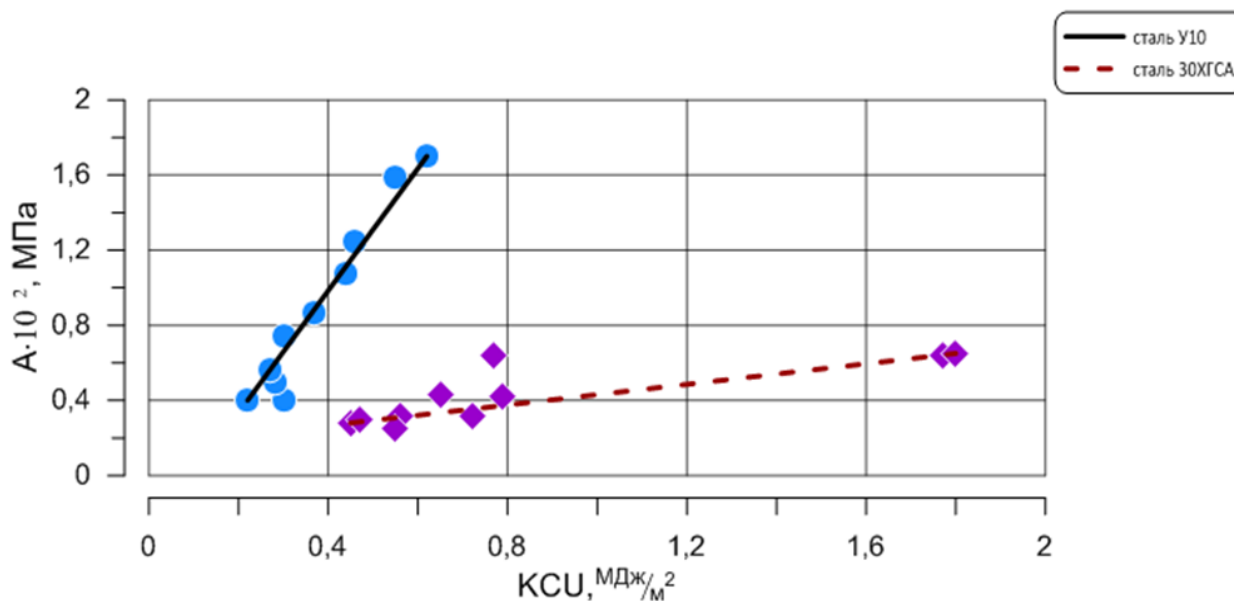


Рис. 1. Зависимость между ударной вязкостью и параметром  $A$

Например, при изменении надреза образца Шарпи с U на V-образный работа его разрушения уменьшится при сохранении, естественно, постоянным параметра  $A$ . В то же время при изменении структуры материала или температуры испытания, влияющих на развитие микропластической деформации, будет изменяться и параметр  $A$ , указывая на повышение или снижение запаса вязкости материала и склонности его к хрупкому разрушению. Таким образом, параметр  $A$  (или другая функция ПМД), включающий имеющий определенный физический смысл характеристики и определенных одним и тем же способом для вязких и хрупких материалов, может служить более объективной характеристикой материала, чем ударная вязкость.

Определение параметров микропластической деформации, производимое на одном типе миниатюрных образцов ( $\varnothing$  3,5 мм, высота 7 мм) с применением одной испытательной машины, позволяет оценить комплекс механических свойств материалов, а именно: пределы упругости, текучести, ударную вязкость, температуру порога хладноломкости. При этом используются микропластические характеристики, имеющие определенный физический смысл, что обуславливает более объективную оценку изменений структуры и более корректное сопоставление свойств, чем при использовании условных стандартных показателей механических свойств металлических материалов.

Такой способ испытания материалов, кроме использования в атомной энергетике, может найти применение для решения различных технических вопросов, например, для контроля свойств материалов трубопроводов и других конструкций, позволяющих периодически производить вырезку небольших объемов материала из наиболее нагруженных участков; при разработке новых сплавов – для экспрессного контроля комплекса механических свойств большого числа композиций, выплавленных в малых количествах. При отработке и совершенствовании технологии возможно применение данного способа для оценки неоднородности механических характеристик и их анизотропии вылитых и кованных деталях сложной формы с резкими переходами по сечению, в которых вследствие разной скорости кристаллизации и различной степени горячей деформации отдельных объемов объективно возникает макронеоднородность структуры, а также – для определения механических свойств материала сварного шва и околошовной зоны и для других целей.

Таким образом, применение параметров микропластической деформации для контроля механических свойств материалов реакторного оборудования предполагает получение ряда преимуществ, а именно:

- повышение точности контроля из-за устранения необходимости введения поправок на разную интенсивность облучения образцов-свидетелей, так как образцы имеют объем в 100 раз меньший, чем, например, стандартные образцы для ударных исследований, и могут быть в достаточном количестве расположены в зоне с практически одинаковой интенсивностью облучения;
- снижение трудоемкости и повышение оперативности контроля в силу использования образцов простой формы, а также применения одной испытательной машины для оценки комплекса механических свойств;
- улучшение социальных условий контроля вследствие существенного уменьшения массы радиоактивных образцов, подвергаемых испытаниям;
- использование характеристик, имеющих определенный физический смысл (вместо условных), позволяет более объективно оценивать состояние материалов и, следовательно, дает возможность более точно прогнозировать их радиационный ресурс.

### Библиографический список

1. **Крюков, Л.Т.** Определение момента перехода материала из пластичного состояния в хрупкое с использованием параметров микропластической деформации // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – №5 (102). – С. 48-53.
2. **Белошенко, В.А.** Определение критической температуры хрупкости методами измерения микротвердости и внутреннего трения / В.А. Белошенко, О.И. Дацко, В.Б. Примислер и др. // Заводская лаборатория. – 1986. – №2. – С. 74-76.

*Дата поступления  
в редакцию: 04.06.2019*

**L.T. Kryukov, M.I. Ershova**

### **CONTROL OF MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS OF REACTOR EQUIPMENT ON THE PARAMETERS OF MICROPLASTIC DEFORMATION**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

**Purpose:** rationale of the use of microplastic deformation parameters to control the mechanical properties of structural steels of reactor equipment.

**Approach:** prediction of the behavior of metals, their welds in normal operating conditions of various parts of reactor structures.

**Results and their application:** the parameters of microplastic deformation is advisable to use as an indicator of embrittlement of steels, microplastic deformation parameters give a more objective assessment of changes in the structure and correct control of mechanical properties, as well as have a certain physical meaning, in contrast to the standard methods of control of mechanical properties of structural steels.

**Conclusions:** experiments carried out on the subject of embrittlement in different steels showed that the embrittlement processes are changing the nature of microplastic deformation. It is found that the parameter A characterizing the length of the microplastic region and the intensity of relaxation of stresses in it is linearly related to the value of KCU and is a more sensitive indicator of embrittlement than the toughness determined in the standard tests of Sharpe samples.

*Keywords:* parameters of microplastic deformation, impact strength, embrittlement of steels.