

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРУЕМОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА ВАЛИКОВ ПРИ КРУЧЕНИИ С ПОМОЩЬЮ ИНДУКЦИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Ю. Б. КОВЕРКИН

*Институт проблем машиноведения РАН, С.-Петербург, Россия,
e-mail: koverkin@rambler.ru*

По результатам экспериментальных исследований установлено, что с помощью индукционных преобразователей можно дать надежную оценку напряженно-деформируемому состоянию валиков из магнитных и немагнитных материалов на любой стадии их нагружения.

Ключевые слова: *индукция, преобразователь, напряжение, деформация, разрушение.*

It is shown according to experimental research results that by means of inductive transducers is possible to estimate reliably the stress-strain state of the magnetic and non-magnetic materials at any stage of their loading.

Key words: *induction, converter, stress, strain, destruction.*

Для повышения надежности конструкций в ряде случаев требуются данные о сопротивлении материала деформациям, развитию дефектов и разрушению. Поэтому можно считать, что деформации и разрушение материалов под действием приложенных сил – это основные факторы, определяющие физико-механическое поведение объектов. Представленные ниже экспериментальные материалы и метод их получения дают возможность контролировать эти факторы оперативно.

За разрушение объекта принято считать момент его разделения, как минимум, на две части. В соответствии с [1] наблюдается четыре стадии развития пластических деформаций и разрушения во времени: инкубационная, торможения, квазистационарная и спонтанно ускоряющаяся. Эти стадии характерны как при растяжении, так и при кручении. Однако необходимо иметь в виду, что при кручении присущая материалам пластичность проявляется значительно, чем при растяжении, когда деформации преждевременно обрываются вследствие заниженного сопротивления отрыву [2]. Более того, в некоторых работах, напри-

мер в [3], отмечается, что абсолютные значения долговечности, полученные для одного и того же металла при растяжении и кручении, могут отличаться на несколько порядков. Весьма важно и то обстоятельство, что пластическое деформирование относится к необратимым процессам, т. е. с использованием одного образца нельзя воспроизвести дважды один и тот же процесс.

Предлагаемые ниже результаты получены при исследованиях нестандартных образцов валиков диаметром 8 – 10 мм, изготовленных из магнитных (сталь) и немагнитных (сплав алюминия) материалов, на установке СБИРАН, обеспечивающей бесконтактные измерения, регистрацию и анализ напряжений при комнатной температуре. В состав установки входит индукционный преобразователь (ИП), который тестировался на стенде, описанном в [4]. Для подтверждения объективности регистрируемого ИП напряженно-деформируемого состояния (НДС) материала экспериментальных валиков проведено сопоставление с НДС стандартных образцов [5, с. 12 – 13].

Изучали поведение материала валиков в трех зонах упругости: упругих деформаций, упругого последействия [5, с. 13] и критических напряжений вплоть до полного разрушения.

На первом этапе исследовали образцы валиков из стали 60С2А (диаметром 10 мм и рабочей длиной 250 мм) и сплава алюминия типа Д1Т (диаметром 8 мм и рабочей длиной 250 мм). Сталь 60С2А относится к группе рессорно-пружинных с модулем упругости $E = 200 \dots 210$ ГПа; модуль упругости сплава алюминия типа Д1Т $E = 70 \dots 72$ ГПа.

На рис. 1, а представлено развитие НДС материала этих валиков в зоне упругих деформаций, из которого следует, что зависимости деформация – напряжение для обоих валиков идентичны по характеру, линейны, но значительно отличаются по величине сигнала и продолжительности зоны упругих деформаций. Для цветных металлов она значительно уже: при скручивании стального валика зона упругих деформаций заканчивалась при угле $\varphi \approx 15^\circ$, а для дюралюминиевого при $\varphi \approx 7^\circ$. Для сравнения на рис. 1, б приводится график напряжение – деформация для стандартного ферромагнитного образца, подвергнутого растяжению традиционным методом [5, с. 12]. По характеру изменения НДС материала графики рис. 1, а, б идентичны. В обоих случаях при снятии нагрузки остаточных напряжений не наблюдается.

Если продолжать нагружение валиков, например из стали, начинается постепенный переход в следующую (вторую) зону упругого после-

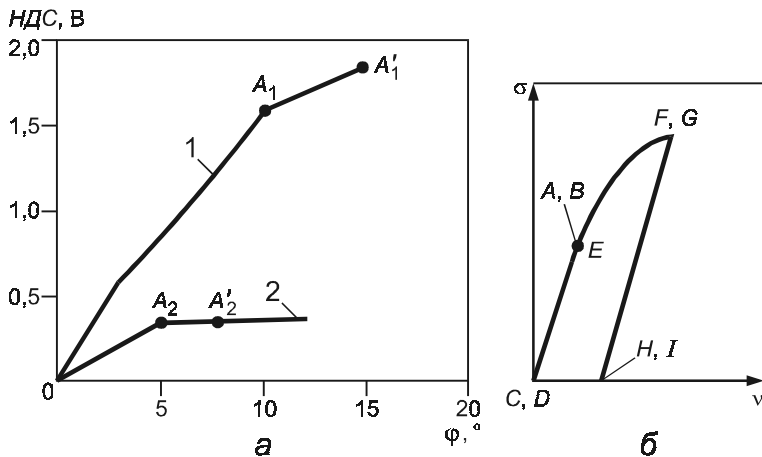


Рис. 1. Развитие НДС материалов валиков (а) и зависимость деформации от напряжений образца ферромагнитного материала, подвергнутого растяжению (б):

1 – сталь 60С2А; 2 – сплав алюминия Д1Т в зоне упругих деформаций

действия (рис. 2, а, отрезок $A_1 - B_1$ кривой 1). В соответствии с [6] можно предположить, что при достижении предела упругости (точка A'_1) начинается некоторое накопление микротрещин в материале валика. Возникновение микротрещин – элементарный акт разрушения и потери прочности. Этим, по-видимому, можно объяснить падение напряжения в материале валика при дальнейшей его деформации (отрезок $B_1 - C_1$ кривой 1). Одновременно с падением напряжения в материале валика уменьшается коэффициент интенсивности напряжения [7]:

$$K = \sigma \sqrt{\pi l y},$$

где σ – напряжение в сечении брутто; l – половина длины трещины; y – функция, зависящая от геометрии образца и трещины. Критическое значение коэффициента интенсивности определяется моментом, при котором наступает нестабильный рост трещины.

При сопоставлении НДС материала образцов в зоне упругого последования, полученных традиционными методами (см. рис. 2, б) и с помощью ИП (см. рис. 2, а, кривая 1), можно сделать вывод об их принципиальной идентичности.

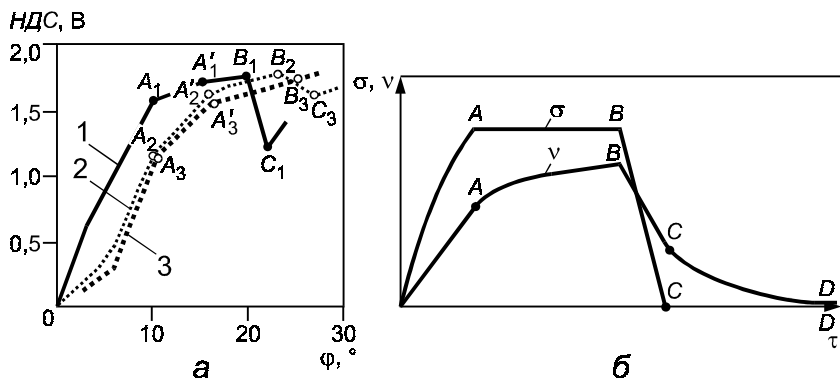


Рис. 2. Зависимости НДС валиков из стали марки 60С2А в зоне упругого последствия, полученные с использованием индукционного преобразователя (а) и традиционным методом (б):

кривые 2, 3 построены через 72 ч и 72 ч 20 мин после нагружения 1

На рис. 2, а представлены также НДС стального валика, снятые с интервалом во времени: кривая 2 построена с выдержкой в 72 ч, кривая 3 через 20 мин. после второго нагружения. Повторяемость процессов, происходящих в материале валиков при их нагружении, весьма высока, однако имеется некоторый сдвиг характерных точек и «размытость» скачков напряжения вследствие взаимодействия с остаточными напряжениями после очередной разгрузки.

По современным представлениям НДС материала в зоне критических напряжений является результатом двух взаимосвязанных процессов: возникновения в исследуемом объекте зародышевых трещин; накопления трещин в зоне разрушения до критической концентрации, при которой тело теряет устойчивость и разрушается.

Эти два процесса как бы обобщают графическое четырехстадийное представление о развитии пластической деформации и разрушении объекта во времени, предложенное в [1].

Для исследований характера нарастания деформаций и разрушения использовали различные валики с рабочей длиной 250 мм:

- шестигранный валик с расстоянием 10 мм между параллельными гранями из инструментальной стали типа У7;
- валик диаметром 10 мм из легированной стали 60С2А;
- валик диаметром 8 мм из сплава алюминия типа Д1Т.

Перед началом исследований расчетным путем с применением «классических» методов для статических условий установили прочность валика из стали 60С2А: при $[\sigma_b] = 1600 \dots 1800 \text{ Н/мм}^2$ предел упругости материала валика наступает при угле закручивания $\varphi = 17 \dots 21^\circ$, а разрушение при $\varphi = 45 \dots 50^\circ$. Экспериментально эти данные не подтвердились.

Во время проведения экспериментов контролировали:

угол φ закрутки валика (по круговой градусной шкале). Из-за значительных деформаций угловой шаг для контрольных точек был переменным и колебался от 5° в зоне упругих деформаций до $60 - 90^\circ$ в зоне пластических деформаций;

момент разрушения валика (по резкому падению усилия закрутки и звуковому «хлопку»);

влияние концентраторов напряжений в месте разрушения и положение плоскости разрушения относительно оси валика.

При исследовании шестигранного валика из инструментальной стали У7 требовалось найти критический угол $\varphi_{кр}$ закрутки – угол разрушения валика и положение плоскости разрушения относительно его оси, учитывая относительно высокую хрупкость таких материалов. Фиксация места разрушения валика обеспечивалась с помощью концентратора напряжения в виде кольцевой канавки прямоугольного сечения $0,5 \times 0,5 \text{ мм}$, выполненной по периметру валика; по двум параллельным граням валика канавка располагалась перпендикулярно его оси, а по боковым граням под углом 45° . Такое расположение канавки позволяет опытным путем проверить правильность утверждения [8], что при $\sigma = 0$, когда анизотропия отсутствует и магнитная проницаемость материала валика $\mu_{x1} = \mu_{y1} = \mu$ и коэффициенты, учитывающие степень магнитной анизотропии проводящего полупространства $\beta_1 = 1$, $\beta_2 = 0$, при приложении к валику крутящего момента в материале возникают нормальные напряжения σ_n , действующие под углом $\alpha = \pm 45^\circ$ к его образующей. Вид и положение плоскости излома относительно образующей валика представлены на рис. 3.

В процессе деформации (кручения) валика рост напряжения, индуцируемого ИП, был незначительным: от 0 до $0,023 \text{ В}$. При угле закрутки $\varphi = 270^\circ$ зафиксирован резкий хлопок, свидетельствующий о хрупком изломе валика, плоскость которого прошла через верхнюю канавку на параллельной грани валика, перпендикулярную его оси. Плоскость разрушения располагалась практически перпендикулярно

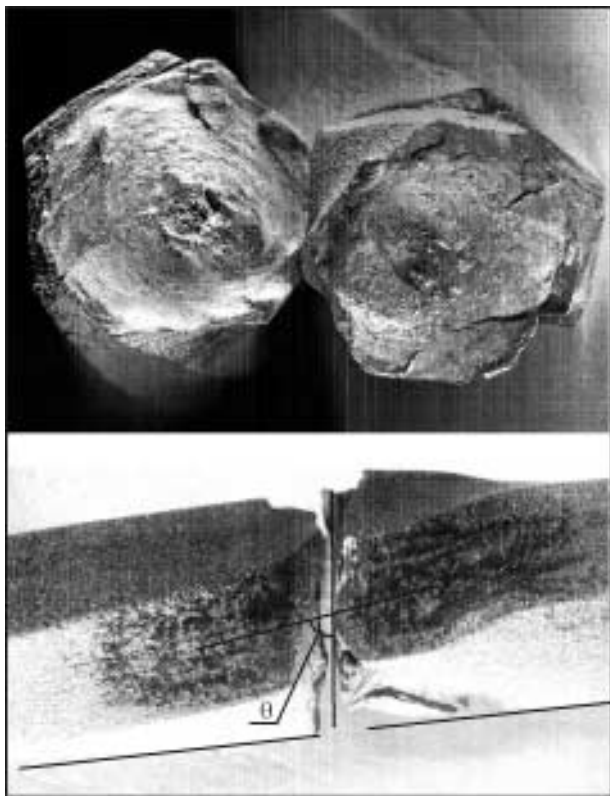


Рис. 3. Вид поверхностей излома и их положение относительно оси вала

оси вала, угол наклона относительно оси составил $\theta \approx 79 - 82^\circ$, при удельной деформации валика $\delta \approx 0,8^\circ/\text{мм}$.

При исследовании НДС материала валика из стали 60С2А применяли ИП с числом витков медной проволоки 2700 и диаметром проволоки 0,5 мм, через валик проходил ток силой $I = 0,4$ А и частотой $f = 3420$ кГц. Один конец валика закрепляли неподвижно, а другой можно было свободно вращать с помощью рычага. Деформацию валика контролировали по круговой градусной шкале. Ожидаемое место разрушения валика при кручении предполагали в месте перехода круглого сечения валика в квадратное со стороной квадрата больше диаметра валика.

При использовании рычага длиной 0,5 м в зоне $\varphi = 200 \dots 220^\circ$ крутящий момент достигал $M = 12 \dots 15$ Н·м. Разрушение валика наступало в конце второго оборота при $\varphi_{кр} = 711^\circ$. Характер процесса представлен рис. 4, где четко выражены все стадии НДС материала в процессе разрушения. Особо выделяется участок $\varphi = 360 \dots 450^\circ$, на котором наблюдается более чем двукратное падение напряжения, несмотря на постоянное нарастание деформации валика до момента полного разрушения при $\varphi_{кр} = 711^\circ$. Этот процесс можно объяснить, если воспользоваться результатами [6]: на основе температурно-временной зависимости прочности обнаружен флуктуационный механизм зарождения микротрещин в твердом теле, приводящий к потере прочности. Центрами образования микросплошностей служат отрицательные флуктуации сплошности – дилатоны, благодаря пониженной плотности являющиеся ловушками для акустических фононов. При благоприятных условиях в силу нелинейных эффектов поглощение фононов дилатонами приводит к параметрической накачке энергии, тепловому расширению и распаду дилатона с образованием микротрещин. Таким образом, происходят накопление микротрещин в теле и их концентрация в зоне разрушения, следовательно, увеличивается деформация тела без изменения напряжения, оно теряет устойчивость и разрушается.

Единственное отличие условий эксперимента при разрушении валика из сплава алюминия Д1Т – применение индукционной катушки с меньшим по сравнению с ИП числом рабочих витков 900. Использовали гладкий по всей длине валик без концентраторов напряжений.

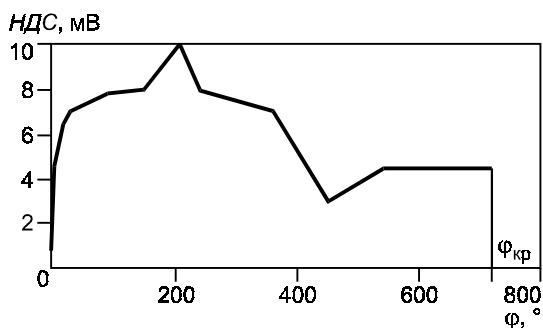


Рис. 4. Изменение НДС материала валика из стали 60С2А от начала цикла нагружения до разрушения, $\varphi_{кр} = 711^\circ$

Графически процесс разрушения данного валика представлен на рис. 5, а. Полное разрушение происходило при $\varphi_{кр} = 2110^\circ$. Расстояние от сечения валика, к которому был приложен крутящий момент, до плоскости разрушения составило 60 мм. Таким образом, удельная деформация при разрушении $\delta = 8,46^\circ/\text{мм}$, положение плоскости разрушения относительно оси валика определялось углом $\theta \approx 79^\circ$ (рис. 5, б). Для изучения поверхности разрушения валика применяли оптический микроскоп НЕОРНОТ-32 в темном поле. Поверхность излома характеризуется тусклым серым цветом и характерными волокнами, имеет вид кристаллической, без видимых следов пластической деформации. Количество вязкой составляющей в изломе определяли по формуле, приведенной в стандарте [9]: $B = 100 - x$, где x – доля хрупкой составляющей в рассматриваемой площади излома. Получили два значения $B = 98,9; 99,1\%$, из которых следует, что валик сильно деформирован, излом хрупкий. На наружной поверхности валика отчетливо видны следы деформации кручения в виде винтовых линий (см. рис. 5, б).

Графическая запись процесса разрушения валика (см. рис. 5, а) с использованием при обработке данных линейной интерполяции напоминает колебательный процесс, что может отражать циклический харак-

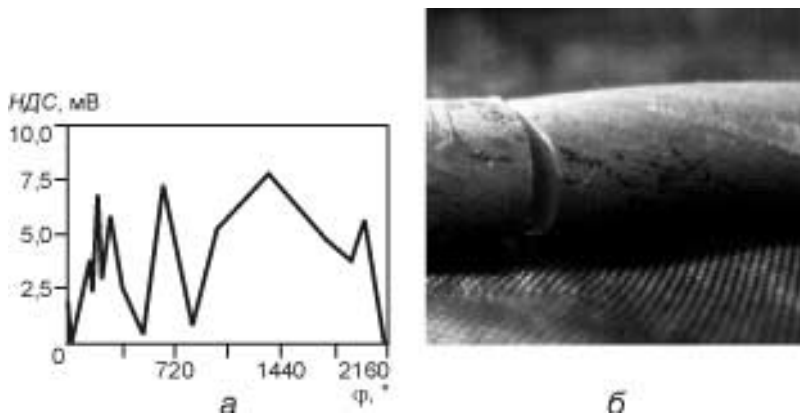


Рис. 5. График изменения НДС материала валика из сплава алюминия Д1Т от начала цикла нагружения до разрушения, $\varphi_{кр} = 2110^\circ$ (а) и положение плоскости разрушения этого валика относительно его оси при кручении (б)

тер накопления микротрещин внутри материала валика при его деформировании. Для объяснения этого эффекта потребуются дополнительные исследования.

Выводы. Представленные результаты исследования подтверждают возможность практического использования предлагаемого метода оценки НДС материалов. Метод прост, понятен и дает надежные результаты, при сопоставлении которых с данными, получаемыми на стандартном оборудовании, подтверждаются их эффективность и оперативность.

Была дана качественная оценка проведенных исследований, что позволяет перейти к экспериментам с использованием калиброванных образцов валиков с контролируемым крутящим моментом.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. **Фридман Я. Б.** Механические свойства материалов. М.: Машиностроение, 1974.
2. **Фридман Я. Б., Володина Т. А.** Сопоставление методов растяжения и кручения закаленных и отпущенных сталей //Заводская лаборатория. 1946. № 9 – 10. С. 861.
3. **Куров И. Е., Степанов В. А.** Долговечность металлов при кручении //ФТТ. 1962. Т. 4. Вып. 1.
4. **Губанов Н. Н., Коверкин Б. Б.** Электромеханический эффект и его использование для контроля деформации кручения валов //Измерительная техника. 2005. № 12. С. 42 – 46; **Gubanov N. N., Koverkin Yu. B.** Electromechanical effect and its use for monitoring shaft torsional strain //Measurement Techniques. 2005. V. 48. N 12. P. 1210 – 1216.
5. **Макклиток Ф., Аргон А.** Деформация и разрушение материалов. М.: Мир, 1970. Ч. 1. Гл. 1.
6. **Журков С. Н.** Дилатонный механизм прочности твердого тела //ФТТ. 1983. Т. 25. Вып. 10.
7. **Физические** величины: справочник /Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.
8. **Левинтов С. Д., Борисов А. М.** Бесконтактные магнитоупругие датчики крутящего момента. М.: Энергоатомиздат, 1984.
9. **ГОСТ 30456-97.** Металлопродукция. Прокат листовой и трубы стальные. Методы испытания на ударный изгиб.

Дата принятия 04.08.2010 г.