УДК 620.175:53.032:534.012

И.Г.Довгялло, В.И.Борд

ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННЕГО ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ТОЛСТОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРОВ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ВИБРАЦИОННЫХ НАГРУЗОК

Повышение динамических характеристик механизмов и машин лесной промышленности, обусловленное интенсификацией эксплуатационных режимов, выдвигает перед конструкторами неотложную задачу по обеспечению высоких прочностных свойств наиболее ответственных деталей и узлов, испытывающих многофакторные механические воздействия. Для расчета деталей машин с минимальным коэффициентом запаса прочности нужны точные данные по механическим характеристикам материалов, испытывающим действие статических и колебательных нагрузок, обусловливающих их сложно-напряженное состояние. Поэтому очевидна необходимость дальнейшего расширения и усовершенствования современных методов испытаний материалов, создания новых, более эффективных способов, которые могли бы дать конструкторам реальные расчетные данные.

В данной работе были проведены испытания трубчатых образцов (внутренний диаметр рабочей части 5 мм, наружный – 8 мм) из отожженной стали 40Х и конструкционного сплава Д16 при комплексном сочетании статической нагрузки (крутящего момента и внутреннего гидростатического давления) и высокочастотных продольных вибраций. Испытания проводились при одной скорости кручения (V = 0,3 об/мин) в широком диапазоне давлений (от 20 до 1000 ати) как при одном статическом деформировании, так и при деформации в ультразвуковом поле различной интенсивности.

Установка (рис.1) включала в себя колебательную систему, навешиваемую на машину КМ 50-1 для испытания образцов на кручение, и стенд высокого гидростатического давления.

В качестве источника электрической энергии ультразвуковой частоты был применен стандартный ультразвуковой генератор УЗГ-10-22, а преобразователем электрических колебаний в механические служил магнитострикционный преобразователь пакетного типа ПМС15А-18 с резонансной частотой 17,6 кГц ,

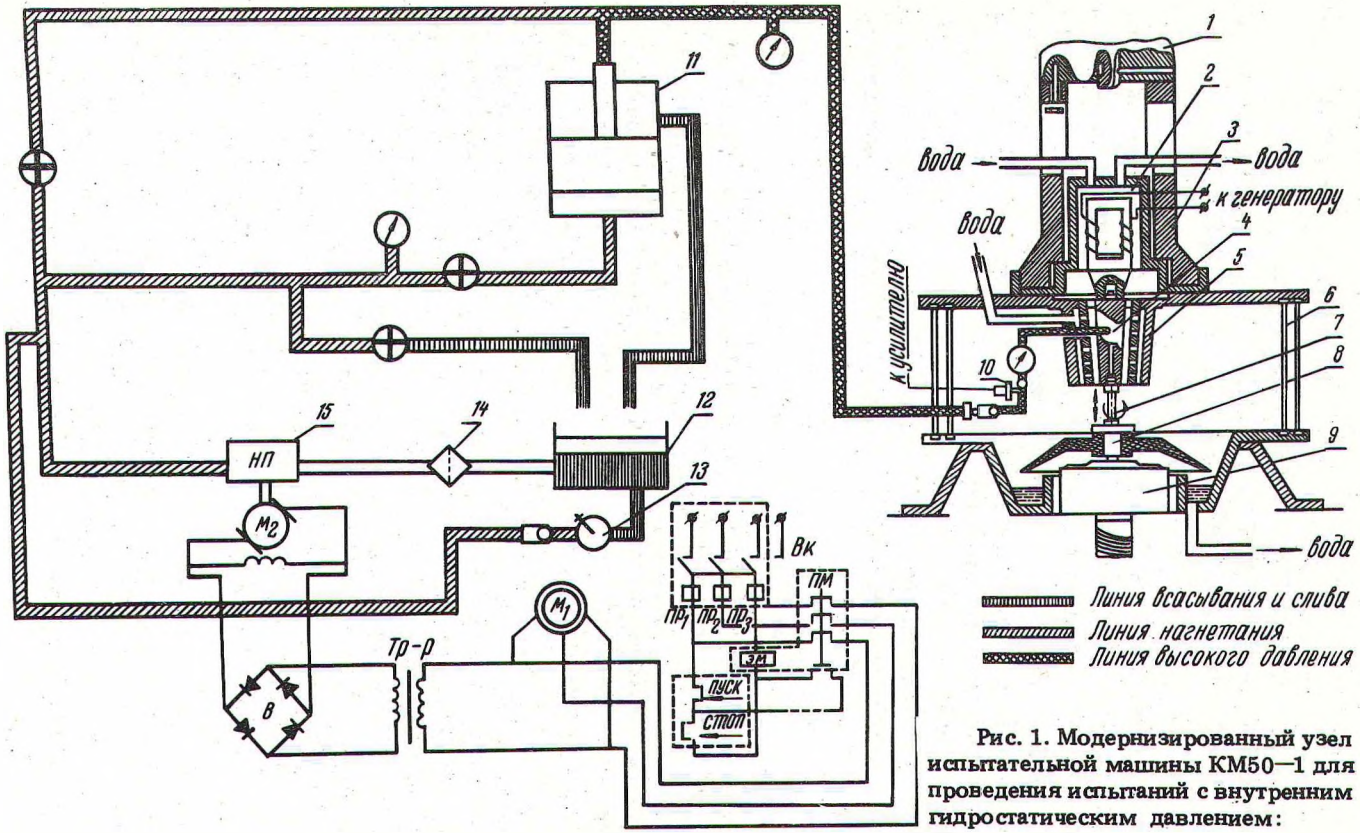

Рис. 1. Модернизированный узел испытательной машины КМ50—1 для проведения испытаний с внутренним гидростатическим давлением:

1 — верхний неподвижный захват; 2 —магнитострикционный преобразователь ПМС15А—18; 3 — стакан; 4 — концентратор; 5 — охлаждающий конус; 6 — защитное ограждение; 7 — образец; 8 — отражатель; 9 — трехкулачковый патрон; 10 — образец-дублер; 11 — мультипликатор; 12 — масляный бак; 13,15 — соответственно ручной и электроприводной насосы; 14 — гидравлический фильтр ФГ—44.

которая поддерживалась в процессе работы с помощью системы обратной связи и различных электронных устройств.

Для эффективной передачи мощности, снимаемой с вибратора на образец, применялся концентратор конической формы с различным коэффициентом усиления.

Вся колебательная система (преобразователь - концентратор - образец - отражатель) была набрана из резонансных элементов, равных длине полуволны ультразвуковых колебаний, соединенных друг с другом резьбовыми соединениями в узлах напряжений, которая работала в режиме стоячей волны.

Для создания в образце внутреннего гидростатического давления была разработана установка, принципиальные гидро- и электросхемы которой показаны на рис. 1.

Масло из бачка, проходя через гидравлический фильтр ФГ-44, поступало в образец через просверленное в концентраторе отверстие от электроприводного насоса 465Д плунжерного типа. В качестве рабочей жидкости применялось масло АМГ-10 (ГОСТ 6794-53). Привод насоса осуществлялся электродвигателем постоянного тока типа МП-6000 с номинальным числом оборотов в минуту 8000+300, напряжением питания 27 В и потребляемой силой тока при номинальном режиме не более 320А. Преобразование переменного тока в постоянный выполнялось с помощью трансформатора ТС-500 и кремниевых выпрямителей ВК2-200, охлаждаемых вентилятором.

При создании высокого давления масло поступало в образец через мультипликатор, работа которого обеспечивалась игольчатыми кранами линии нагнетания. Для сравнительно невысоких давлений (до 300 ати) в гидравлической схеме был предусмотрен ручной насос.

Контроль давления в системе осуществлялся образцовыми манометрами линии нагнетания и линии высокого давления. Для измерения давления в образце в течение всего времени испытаний в рабочей части установки, кроме манометра, использовался образец-дублер, включаемый в систему, с наклеенными на него тензодатчиками сопротивления, показания которых через тензометрический усилитель записывались на осциллограф.

Давление в рабочей части установки после отключения остальной системы удерживалось с помощью игольчатого крана, обратного клапана и дополнительной емкости, служащей для компенсации возможных незначительных потерь.

Подвод масла в линиях всасывания и нагнетания осуществлялся армированными шлангами, а в линии высокого давления – стальными толстостенными трубками.

Диаграммы кручения трубчатых образцов строились в координатах $\tau_{уср} - \gamma_{уср}$, определяемых по формулам, предложенным К.К.Пахотиным и Л.М.Седоковым [1].

Усредненные касательные напряжения $\tau_{уср}$ определялись из предположения равномерного распределения их по радиусу толстостенного образца в области больших пластических деформаций, т.е.

$$\tau_{уср} = \frac{M_к}{W_{пл}},$$

где $M_к$ – крутящий момент, а

$$W_{пл} = \frac{2}{3}\pi (b^3 - a^3).$$

Средняя по объему образца величина максимального сдвига

$$\gamma_{уср} = \frac{2}{3}\gamma_b\left[1 + \frac{a^2}{b(b+a)}\right],$$

где a, b – соответственно внутренний и наружный радиусы образца.

Изменения механических характеристик (усредненных предела прочности – $\tau_{к\ уср}$, предела текучести – $\tau_{0,3\ уср}$ и относительного сдвига – $\gamma_{уср}$) стали 40Х и сплава Д16 при деформации в ультразвуковом поле различной интенсивности в зависимости от величины внутреннего гидростатического давления представлены на рис. 2 и 3.

Анализируя полученные данные, необходимо отметить, что величина внутреннего гидростатического давления оказывает существенное влияние на изменение механических характеристик исследуемых материалов как при одной статической деформации, так и с наложением ультразвукового поля.

Так, при статическом кручении образцов из стали 40Х увеличение давления до определенного значения приводило к повышению механических характеристик, после которого наблюдалось их снижение (рис. 2).

Если при давлении P = 20 ати $\tau_{к\ уср} = 46{,}07$ кгс/мм^2, то при P = 800 ати $\tau_{к\ уср} = 53{,}5$ кгс/мм^2, т.е. предел

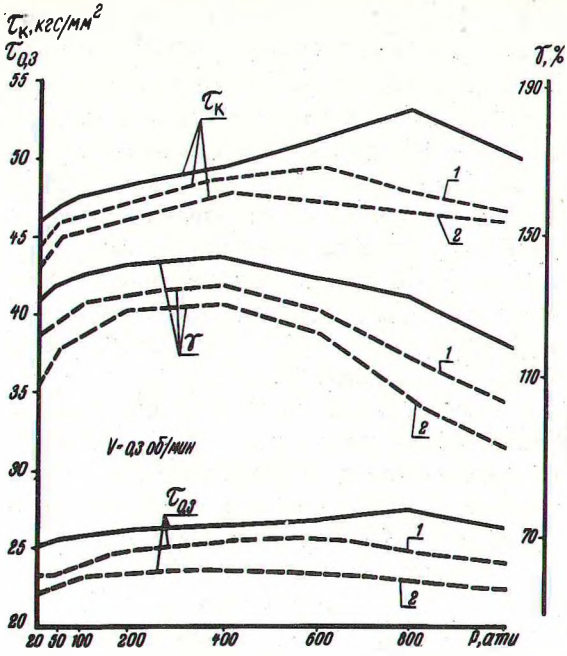

Рис. 2. Изменение механических характеристик стали 40Х при деформировании в ультразвуковом поле различной интенсивности в зависимости от величины внутреннего гидростатического давления: сплошные линии – без ультразвука; штриховые – с ультразвуком; 1,2 – A_0 = 12 и 20 мкм.

прочности увеличился на 16,4%. Аналогично изменение предела текучести. При P = 1000 ати эти характеристики начали снижаться.

Относительный сдвиг имел наибольшее значение (105,2%) при P=400 ати, после чего начиналось его снижение, и при P=1000 ати он стал равен 83,3%, т.е. уменьшился на 21,9% по сравнению со своим максимальным значением.

Деформирование образцов в ультразвуковом поле при амплитуде колебаний на торце образцов A_0 = 20 и 12мкм (что соответствовало максимальным циклическим напряжениям на их рабочей части σ_{max}, равным для этих амплитуд $\pm$27,7 и 16,6 кгс/мм^2) также сопровождалось изменением механических характеристик с ростом давления, которые однако оставались ниже значений, полученных при статическом кручении для соответствующей величины P. Пределы прочности и текучести достигли своего максимума при P = 400ати (A_0 =

= 20 мкм) и P = 600 ати (A_o = 12 мкм). Относительный сдвиг, достигнув своего наибольшего значения при P = 400ати, увеличился на 27,3% (A_o = 20 мкм) и 14,1% (A_o =12мкм) по сравнению с его значением при P = 20 ати.

Если в качественном отношении влияние внутреннего гидростатического давления на механические характеристики почти одинаково при обоих видах деформирования, то в количественном отношении увеличение давления вело к более существенному изменению этих характеристик при деформации в ультразвуковом поле. Так, с увеличением давления до 800 ати (A_o = 20 мкм) снижение $\tau_{к\ усp}$ составило 12,3%, т.е. почти в 2 раза больше, чем при P = 0, $\tau_{0,3\ усp}$ уменьшился на 16,5%, что в 1,5 раза больше, чем при деформации без внутреннего давления, а изменение $\gamma_{усp}$ составило 31,9% по сравнению с изменением этой характеристики при P = 0. Необходимо также отметить, что если при статической деформации максимальное значение пределов прочности и текучести наблюдалось при давлении P = 800 ати, то при наложении ультразвукового поля наибольшим значением характеристик прочности и пластичности соответствовало давление P = 400 ати (A_o = 20 мкм), P = 600 ати (A_o = 12 мкм для $\tau_{к\ усp}$) и P = 400 ати (A_o = 12 мкм для $\tau_{0,3\ усp}$). По достижению максимума механических характеристик дальнейшее увеличение внутреннего давления при обоих видах деформации приводило к их понижению, причем наложение ультразвукового поля смещало величины этих давлений в сторону меньших значений.

Данные, полученные при аналогичных испытаниях образцов из сплава Д16, по своему характеру полностью совпадают с результатами исследований со сталью 40Х (рис. 3). Наложение ультразвукового поля (A_o = 12 и 7,5 мкм, что соответствует $\sigma_{i\max}$ = $\pm$5,7 и 3,6 кгс/мм^2) на процесс статического кручения трубок, нагруженных внутренним давлением, приводило к снижению всех механических характеристик.

При статическом кручении максимальные значения пределов прочности (18,5 кгс/мм^2) и текучести (9,3 кгс/мм^2) были достигнуты при P = 400 ати, а относительного сдвига (67,9%) при P = 100 ати. При циклическом деформировании максимум значений ($\tau_{к\ усp}$ = 16,64 кгс/мм^2 для A_o = 12 мкм и $\tau_{к\ усp}$ =17,77 кгс/мм^2 для A_o = 7,5 мкм) смещен в сторону меньшего давления (P = 200 ати и 300 ати соот-

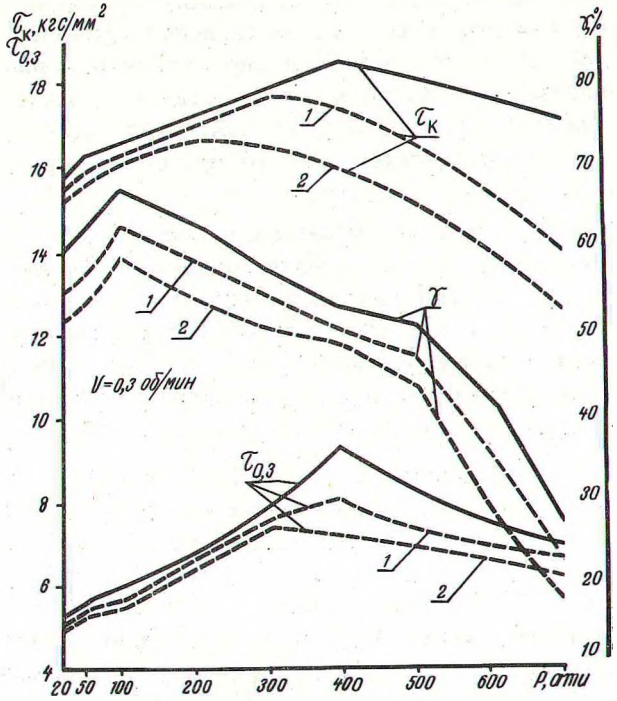

Рис. 3. Изменение механических характеристик сплава Д16 при деформировании в ультразвуковом поле различной интенсивности в зависимости от величины внутреннего гидростатического давления: сплошные линии – без ультразвука; 2 – штриховые – с ультразвуком; 1,2 – A_0 = 7,5 и 12 мкм.

ветственно), а наибольшее значение относительного сдвига ($\gamma_{уср}$ = 60,1%) так же, как и при статическом кручении, соответствовало давлению 100 ати.

Таким образом, проведенные эксперименты по влиянию высокочастотных вибраций на процесс статического кручения образцов из стали 40Х и конструкционного сплава Д16, нагруженных внутренним гидростатическим давлением, показали примерно одинаковую зависимость. При наложении ультразвуковых колебаний происходит сложный процесс, зависящий как от величины давления, так и от действия циклических нагрузок. Внутреннее гидростатическое давление при обоих видах нагружения приводит к изменению механических характеристик и образованию максимумов их значений. Причем ультразвуковые колебания ускоряют этот процесс и способствуют достижению максимумов при меньших давлениях.

Сделанный анализ поведения образцов из различных материалов позволяет отметить, что наибольшее влияние ультразвука начинает проявляться после определенной величины внутреннего давления, при котором механические характеристики достигают своих оптимальных значений, после чего начинается их интенсивное понижение, в то время как при статической деформации они еще растут.

Расчет напряжений, возникающих в образце от действия одного гидростатического давления, а также сложение напряжений с учетом действия ультразвука дают основание полагать следующее. Как при статической деформации, так и при деформировании в ультразвуковом поле резкое снижение прочностных характеристик исследуемых материалов начинается при давлениях, создающих эквивалентное напряжение $\sigma_{экв}$, которое соответствует статическому пределу текучести ($\sigma_т$) или несколько превышает его. Так, например, при деформации стали 40Х без наложения ультразвуковых колебаний падение $\tau_{к\ усл}$ и $\tau_{0,3\ усл}$ наблюдалось после Р = 800 ати. В этом случае $\sigma_{экв}$ почти совпадает со значением $\sigma_т$. При деформации же в ультразвуковом поле, эквивалентному напряжению, которое равно пределу текучести этого материала, соответствовало меньшее давление (Р = 400 ати для A_o = 20 мкм и Р = 600 ати для A_o = 12 мкм) вследствие дополнительного напряжения, возникающего от действия циклических нагрузок ($\sigma_{umax} = \pm 27{,}7$ кгс/мм^2 и 16,6 кгс/мм^2).

Анализ диаграмм деформированного упрочнения показывает, что наложение высокочастотных вибраций в процессе статического кручения толстостенных полых цилиндров, находящихся под действием внутреннего гидростатического давления, изменяет не только конечные свойства исследуемых материалов – сопротивление разрушению и предельную пластичность, но в большинстве случаев и весь ход кривых течения.

Литература

1. Пахотин К.К., Седоков Л.М. Метод определения истинных напряжений толстостенных трубчатых образцов при кручении. – Заводская лаборатория, 1971, №1.