

стали при напряжениях выше статического предела текучести. — В сб.: Качество и надежность металлообрабатывающего оборудования. М., 1969. 8. Серенсен С.В. и др. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. Киев, 1963. 9. Справочник машиностроителя, т. 3. М., 1962. 10. Степанов М. Н. Статистическая обработка результатов механических испытаний. М., 1962. 11. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятности и математической статистики для технических приложений. М., 1965.

А.Ф. Тихонов, И.Г. Довгялло, П.Ф. Рудницкий,
В.И. Борд, Н.А. Долбин, А.М. Ипонов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ЛЕСНЫХ МАШИН ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ НАГРУЖЕНИЯ

В решении задач, поставленных перед работниками лесной промышленности, чрезвычайно большое значение приобретает проблема повышения надежности и долговечности конструкций машин.

Усилия исследователей направлены в настоящее время на решение двух основных задач: с одной стороны — создание материалов с высоким сопротивлением разрушению при разных условиях нагружения, с другой — поиск методов правильной оценки поведения используемых материалов в условиях эксплуатации. Успехи в решении этих задач зависят прежде всего от того, насколько верны представления о физической сущности процессов, происходящих при сложном нагружении материала.

В большинстве работ применяются критерии прочности и пластичности, которые фиксируют только конечные стадии нагружения, не отражая кинетики процессов, протекающих в материале, и не используя неразрушающих методов исследований. В связи с этим кинетическая интерпретация процессов сложного нагружения металлов и сплавов представляет большой научный и практический интерес.

Целью нашей работы было исследование влияния различных схем нагружения, имеющих место при работе деталей лесных машин, на изменение физико-механических характеристик

металлов и сплавов в любой период их эксплуатации. Определив это и используя методы неразрушающего контроля, можно прогнозировать работоспособность и устанавливать оптимальные режимы работы таких деталей, а также производить точную оценку ресурса работоспособности их после ремонта [1, 2].

Различные схемы сложного нагружения обеспечивались путем создания в образцах трубчатого и сплошного сечений соответственно внутреннего гидростатического давления и крутящего момента в сочетании с циклическими нагрузками ультразвуковой частоты ($f = 17,6$ кгц), которые имитировали работу трубопроводов, валов, коленчатых валов и т.п.

Испытания проводились на отожженных после окончательной механической обработки в вакууме при 10^{-4} мм рт.ст. образцах, изготовленных из технически чистой меди М1, стали 40Х и конструкционного сплава Д16. Отношение наружного и внутреннего диаметров рабочей части трубчатых образцов составляло для меди М1 18:15, стали 40Х - 16,5:15 и сплава Д16 - 16:14. Рабочий диаметр стержней сплошного сечения из всех исследуемых материалов был равен 6 мм. Все образцы перед испытанием подвергались электрополировке [3 - 5].

Нагружение трубчатых образцов внутренним гидростатическим давлением производилось ступенями при помощи насоса плунжерного типа и мультипликатора, входящих в специально сконструированный стенд, описанный в работе [6]. Величина давления контролировалась эталонными манометрами класса точности 0,35, а радиальная деформация образцов фиксировалась микронными индикаторами часового типа. Наложение высокочастотных вибраций осуществлялось с помощью магнито-стрикционного преобразователя ПМС15А-18, работающего от ультразвукового генератора УЗГ10-22 и концентраторов конической формы, которые являлись составной частью установки, позволяющей производить на каждой из ступеней исследование значений микротвердости и электропроводности. Измерение вышеуказанных параметров велось непосредственно в процессе нагружения (без снятия внутреннего давления), что давало возможность проследить за их изменением в упругой и пластической зонах.

Создание в сплошных образцах крутящего момента и высокочастотных вибраций производилось на модернизированной испытательной машине КМ50-1 [7]. Для отражения кинетики процессов, протекающих в материале при разных величинах крутящего момента и времени озвучивания, образцы закручива-

лись соответственно на 5° , 10° , 20° , 30° , 60° , 90° , 120° , 180° , 270° , 360° и далее через 90° .

Метод микротвердости, позволяющий определить твердость материала в его микроскопически малых объемах и даже отдельных зернах, является очень тонким средством исследования металлов и сплавов.

Величины микротвердости определялись модернизированным прибором ПМТ-3, у которого поворот образца на предметном столике относительно индентора был заменен поворотом последнего по отношению к образцу (оптическое устройство и механизм нагружения ПМТ-3 оставались неизменными).

С целью выявления границ зерен производилось химическое травление [8]. Значение H_{μ} представляло собой среднее измерение в пяти точках, отстоящих друг от друга на расстоянии примерно в полторы длины диагонали отпечатка [9].

Измерение электропроводности производилось по величине падения напряжения между контактными ножами, изготовленными из красной меди с помощью низкоомного потенциометра Р-348 класса точности 0,002, работающего совместно с фотоэлектрическим усилителем Ф305,2 и переключателем направления тока П-308.

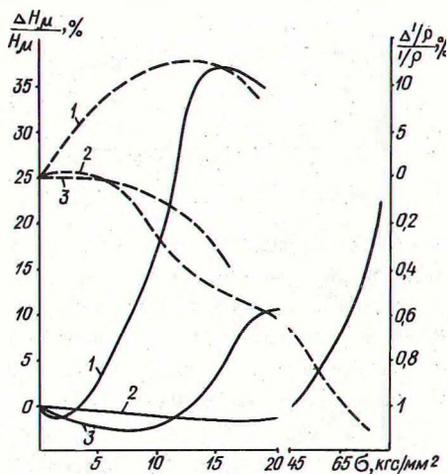


Рис. 1. Изменение относительных значений микротвердости (-) и электропроводности (—) в зависимости от величины напряжения, вызванного внутренним давлением: 1—М1; 2 — 40Х; 3—Д16.

На рис. 1, 2 показаны изменения относительных значений микротвердости и электропроводности в зависимости от величины напряжения, возникающего под действием внутреннего гидростатического давления и циклических нагрузок ультразвуковой частоты.

Как видно из рис. 1, 2, влияние внутреннего давления на изменение микротвердости образцов из стали 40X, дюралюминия Д16 и меди М1 качественно аналогично. После некоторого первоначального снижения H_{μ} следовало значительное упрочнение поверхностного слоя, которое сменялось разупрочнением только перед самым разрушением образцов.

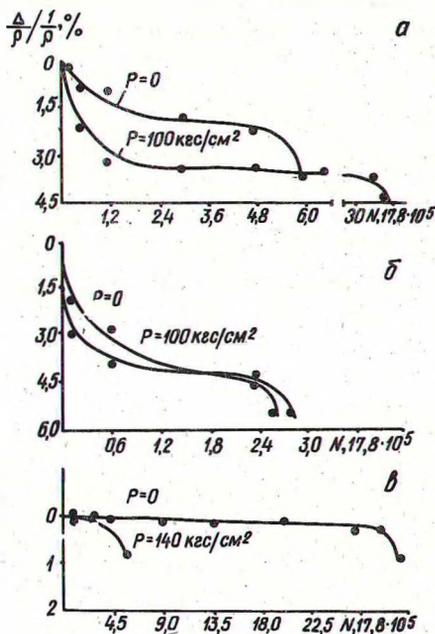


Рис. 2. Влияние циклического напряжения и внутреннего давления на изменение относительных значений электропроводности:
 а — 40X ($A=0,030$ мм);
 б — М1 ($A=0,020$ мм);
 в — Д16 ($A=0,012$ мм).

Микротвердость изменяется вследствие возникновения остаточных напряжений и наклепа. Она характеризует упрочнение и разрушение металла при его деформировании. Снижение значений микротвердости в упругой зоне можно объяснить действием растягивающих напряжений [10], а падение непосредственно перед разрушением свидетельствует о том, что упрочнение в зоне разрыва образца отсутствует.

Если для стальных и дюралюминиевых образцов электропроводность с ростом давления падала (рис. 1), то для медных наблюдалось ее первоначальное повышение, что, по-видимому, является причиной значительного упрочнения отожженной меди от действия гидростатического давления.

Наложение высокочастотных колебаний вызывало уменьшение электропроводности в начальный период нагружения (рис. 2),

после чего величина $1/\rho$ стабилизировалась, и перед разрушением происходило резкое ее падение. При одновременном действии циклических нагрузок и внутреннего гидростатического давления характер изменения электропроводности оставался прежним, но более ярко выраженным в сторону уменьшения, особенно в начальный период нагружения.

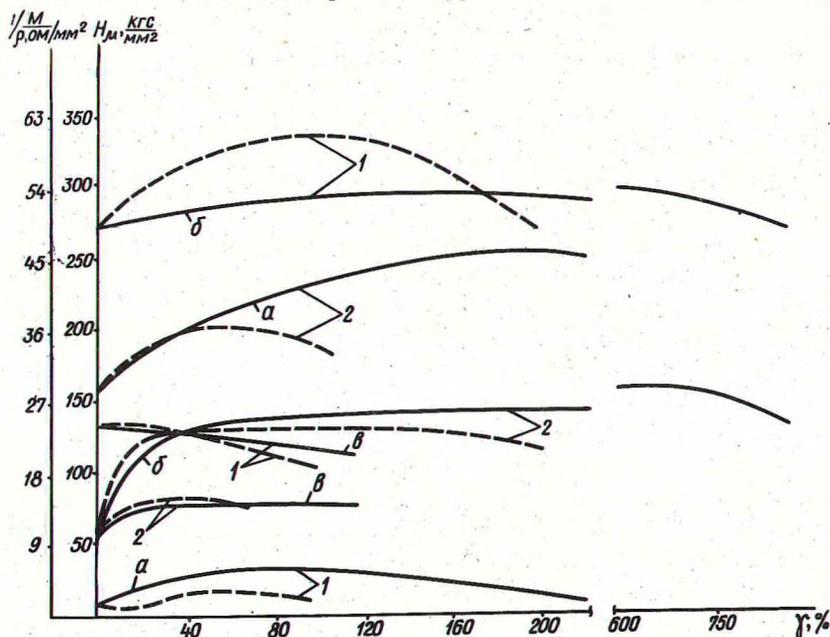


Рис. 3. Изменение электропроводности $1/\rho$ и микротвердости H_μ в зависимости от величины относительного сдвига при кручении: а — 40X; б — М1; в — Д16. 1 — электропроводность; 2 — микротвердость; прямая линия — без ультразвука; пунктирная — с ультразвуком.

Результаты экспериментов по изменению микротвердости образцов из стали 40X, сплава Д16 и меди М1 при их кручении без наложения и с наложением высокочастотных вибраций показали, что при деформации в ультразвуковом поле следует более интенсивный рост значений этой характеристики на начальной стадии деформирования (рис. 3).

Такое первоначальное упрочнение в отличие от ранее описанных схем нагружения можно объяснить действием макси-

мальных касательных напряжений на поверхности образцов. Как и в первых случаях, увеличение степени деформации приводило к последующему разупрочнению, что наблюдалось в пересечении кривых микротвердости при циклическом и статическом кручении. Максимальные значения H_{μ} , достигнутые при циклическом кручении, оставались в то же время меньше величин микротвердости образцов, полученных путем обычного кручения. Так, сравнение с исходными значениями показало, что микротвердость образцов из стали 40X при статическом кручении увеличилась на 31%, а при циклическом – на 22,6, для меди М1 – соответственно на 181 и 126,4%. Увеличение значений H_{μ} образцов из сплава Д16 при обоих видах кручения было почти одинаковым и составило 23,2%, однако, как и для образцов из стали 40X, у сплава Д16 "насыщение" в улучшении поверхностного слоя происходило на более ранней стадии при кручении в ультразвуковом поле.

Для кривой изменения электропроводности образцов из стали 40X (рис. 3) при статическом кручении характерно незначительное (до 5%) повышение значений $1/\rho$ в начальной стадии деформирования ($\gamma^* = 14,4\%$), после чего она начинала заметно снижаться вплоть до разрушения образца. В противоположность этому при кручении в ультразвуковом поле сразу происходило падение электропроводности (также до 5%) до $\gamma^* = 7,2\%$. Затем после небольшого повышения $1/\rho$, не доходящего до исходного значения, она интенсивно снижалась.

В отличие от стальных образцов, характер кривых электропроводности сплава Д16 при статическом и динамическом кручении совпадал (рис. 3). Здесь сразу наблюдалось начальное снижение этой характеристики при обоих видах деформирования с последующим повышением ее, после чего наступало интенсивное падение $1/\rho$.

Почти аналогично изменению электропроводности медных образцов (рис. 3). При статическом кручении после едва заметного снижения следовало некоторое повышение (до 7%) значений электропроводности (при $\gamma^* = 187,9\%$), а затем начиналось ее постепенное падение, более резко выраженное к моменту разрушения образца. При циклическом нагружении после начального снижения $1/\rho$ наблюдалось ее увеличение примерно до 9% (при $\gamma^* = 46,8\%$). После достигнутого максимума происходило интенсивное падение значений электропроводности.

Как видно из результатов экспериментов, электропроводность весьма чувствительна к пластическому деформированию.

Относительно высокая чувствительность данной характеристики к изменению плотности дефектов в кристаллической решетке металла позволяет успешно использовать ее для изучения процессов накопления повреждаемости и разрушения металлов и сплавов.

Значительный интерес представляет изучение магнитных свойств ферромагнитных материалов. Характерным свойством ферромагнетиков является наличие в них областей спонтанной намагниченности или доменов.

Исследование изменений магнитных характеристик производилось на созданном в отделе физики неразрушающего контроля АН БССР многопараметровом измерителе магнитных характеристик ИМХ-1 высокой чувствительности. Этот прибор позволял синхронно измерять три параметра: максимальную и остаточную индукции и коэрцитивную силу. Изменения этих величин фиксировались индикаторами стрелочного типа. Кроме того, изменение выходного сигнала ИМХ-1, пропорциональное изменению коэрцитивной силы, записывалось на бумажной ленте с помощью прибора Н-373-2.

Сплошной образец из стали 40Х помещался в специальную герметичную намагничивающе-считывающую катушку с числом витков $2 \times 1600 - 0,1$ и $1 \times 484 - 0,86$. Измерения производились в процессе кручения на участке длиной 10 мм при величине напряженности намагничивающего поля $H_m = 2459$.

При перемещении образца в переменном магнитном поле в нем возникают макро- и микроскопические вихревые токи, создающие свой магнитный поток, направленный в каждый момент времени противоположно магнитному потоку, связанному с внешним магнитным полем. Это приводит к неравномерности распределения индукции и напряженности поля по сечению образца, которые убывают с удалением от поверхности.

При работе ферромагнитных материалов в переменных магнитных полях происходит их перемагничивание под действием периодического симметричного магнитного поля. При этом магнитное состояние изменяется по симметричной петле, похожей по форме на петлю гистерезиса.

Наши исследования проведены при частных циклах симметричной петли, где V_m , V_r и H_c - соответственно значения максимальной, остаточной индукции и коэрцитивной силы для данного частного цикла.

На рис. 4 приведены кривые изменения динамических магнитных характеристик ΔV_m , ΔV_r и ΔH_c отожженной

стали 40X в зависимости от степени деформирования кручением без наложения и с наложением ультразвукового поля, представляющих собой разницу между их величинами в данный момент, т.е. при определенном угле закручивания и исходным значением.

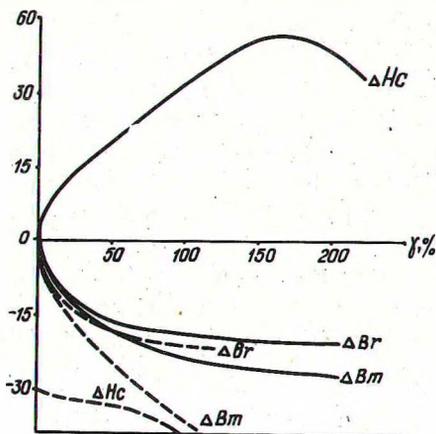


Рис. 4. Изменение магнитной ΔB_m остаточной ΔB_2 индукций и коэрцитивной силы H_c стали 40X в зависимости от величины относительного сдвига при кручении (усл.ед): прямая линия — без ультразвука; пунктирная — с ультразвуком.

Как видно из рис. 4, наложение ультразвукового поля на процесс статического кручения вызвало более выраженное изменение динамических ΔB_m и ΔB_2 в сторону их уменьшения. В отличие от статического кручения, при котором коэрцитивная сила росла почти до разрушения образцов, при циклическом кручении динамическая ΔH_c сразу упала в начальный момент (при $\varphi = 10^\circ$), после чего постепенно возрастала (до $\varphi = 360^\circ$) и в дальнейшем снова стала уменьшаться. Непосредственно перед разрушением образцов наблюдалось резкое падение исследуемых магнитных характеристик, вызванное как дефектностью кристаллической решетки отожженной стали, которая повышает потери на перемагничивание и вихревые токи, так и специфическим характером перераспределения вихревых токов растущей трещиной.

При исследовании динамических магнитных характеристик в процессе озвучивания необходимо, видимо, учитывать явления, связанные с возникновением вихревых токов при смещении границ между доменами и потерями на гистерезис, вызванными переходами доменов из одной ориентации в другую [11], более легкой подвижностью стенок доменов при наложении ультразвукового поля [12], а также дроблением самих доменов [13].

Анализируя изменения динамических магнитных характеристик стали 40Х в процессе деформирования кручением в ультразвуковом поле при величине напряженности намагничивающего поля $H_m = 245Э$ и $\sigma_{п max} = \pm 27,2$ кгс/мм², можно предположить, что при высокочастотном нагружении сначала преобладает влияние указанных выше эффектов озвучивания и лишь затем более заметно начинает сказываться влияние усталостных структурных изменений, которые и вызывают резкое падение динамических ΔV_m , ΔV_r и ΔH_c .

Таким образом, прогрессивное снижение электропроводности, микротвердости, а также возрастание потерь на вихревые токи, свидетельствующие о наступлении стадии разрушения, могут служить предпосылкой для прогнозирования разрушений деталей машин, работающих в различных условиях нагружения.

Л и т е р а т у р а

1. Бабушкин И.Н. Технология ремонта лесозаготовительных и лесохозяйственных машин. М. - Л., 1963.
2. Бабушкин И.Н., Серов А.В. Техническая эксплуатация и ремонт оборудования лесопромышленных предприятий. М., 1971.
3. Плетнев Д.В., Бруснецова В.Н. Основы технологии износостойких и антифрикционных покрытий. М., 1968.
4. Шиголов П.В. Электролитическое и химическое полирование металлов. М., 1959.
5. Валеев А.Ш. Закономерности электролитической полировки дюралюмина. - ЖПХ, 27, № 8, 1954.
6. Довгялло И.Г., Борд В.И. Установка для испытания металлов при сложном нагружении. - В сб.: Материалы научно-технической конференции по итогам научн.раб. 1968 г. Минск, 1969.
7. Довгялло И. Г. Борд В.И. Модернизация испытательной машины КМ50-1 для исследования механических свойств материалов при сложном нагружении. - "Заводская лаборатория", 1973, № 10.
8. Левин Е.Е. Микроскопическое исследование металлов. М., 1955.
9. ГОСТ 9450-60. Метод испытания на микротвердость вдавливанием алмазной пирамиды.
10. Лисицын В.Д. Определение микротвердости металла в момент его напряженно-деформированного состояния. - "Заводская лаборатория", 1957, № 6.
11. Акулов Н.С. О свойствах ферромагнетиков в динамическом режиме. - "Изв. АН СССР. Сер. физ.", т. ХУІ, 1952, № 5.
12. Пузей И.М. и Радьков А.И. Исследование дисперсий ультразвука в ферромагнетиках. - В сб.: Прецизионные сплавы, вып. 25. М., 1962.
13. Лаптей Д.А. и др. Влияние ультразвукового воздействия на доменную структуру кремнистого железа. - В сб.: Применение ультразвуки к исследованию вещества, вып. 15. М., 1961.