

ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ЗЕРНА НА УДАРНО-УСТАЛОСТНУЮ СТОЙКОСТЬ СТАЛИ 45

Г. В. Топоров, Г. Я. Смокотин

Условия эксплуатации машин, применяемых для горных работ, предъявляют особенно высокие требования к долговечности деталей в связи со сложностью организации ремонта на месте работы машины. Задача повышения долговечности деталей горных машин, несмотря на усилия заводов и научных коллективов, остается пока нерешенной.

Важно отметить, что большое количество деталей машин (бурильных и отбойных молотков, угольных комбайнов и т. д.) при эксплуатации подвергается многократно повторяющимся ударам. При проведении нами исследований структуры поломанных деталей, работающих в условиях ударной циклической нагрузки, было установлено, что подавляющее большинство их имело крупнозернистую структуру. Крупнозернистость структуры поломанных деталей (звеньев цепей скребковых конвейеров) была отмечена также М. М. Тененбаумом [1, 2].

В практике горного машиностроения в деталях, подвергающихся нормализации или отжигу, или же совсем не проходящих термической обработки, как правило, размер зерна не нормируется. Больше того, иногда назначаются режимы термической обработки с целью лучшей обрабатываемости деталей без учета возможного снижения механических свойств.

Известно, что особенно большие возражения у производителей встречает введение операции улучшения (закалка с последующим высоким отпускком), так как в этом случае наблюдается ухудшение обрабатываемости резанием. Действительно, сталь с сорбитообразной структурой, получающейся после улучшения, обладая бóльшей твердостью и худшей обрабатываемостью, вместе с тем отличается и более высокими механическими свойствами. В связи с этим возникает вопрос о целесообразности применения термообработки — улучшения для деталей, работающих при ударно-циклическом характере нагружения. Этот вопрос может быть решен только после выяснения преимуществ в сопротивлении ударно-усталостному разрушению стали после улучшения по сравнению с нормализацией.

В многочисленной литературе, посвященной влиянию размера зерна на механические свойства и усталостные разрушения

стали, нам не встречалось работ по вопросам связи между зернистостью и сопротивлением ударно-усталостному разрушению этой стали.

В предлагаемой работе приводятся экспериментальные данные, полученные при исследовании: а) зависимости сопротивления ударно-усталостному разрушению стали 45 от величины зерна и б) влияния различных видов термической обработки (улучшение, нормализация) на стойкость этой же стали при многократном ударном нагружении.

Об испытаниях металлов повторными ударами

Известно, что сталь с крупнозернистым строением обладает повышенной склонностью к хрупким разрушениям. Разница в свойствах при крупно-и мелкозернистом строении одной и той же стали обнаруживается при динамических испытаниях (однократным ударом) на ударную вязкость. В то же время, как это доказано многочисленными теоретическими и экспериментальными исследованиями акад. Н. Н. Давиденкова [3, 4, 5, 6] и его школы, почти все статические испытания дают результаты, не отличающие мелкозернистую сталь от крупнозернистой. Это относится также и к испытаниям статической усталости металлов [7].

Прочность деталей, подвергающихся действию повторных (многократных) ударных нагрузок, может быть оценена либо пределом ударной выносливости, либо количеством ударов до разрушения при заданной постоянной энергии удара.

Как указывают Н. Н. Давиденков и Е. И. Беляева [8], «ударной усталостью металловеды стали заниматься еще в 1908 г., когда Стентон построил для этой цели примитивную машинку», на которой изгибающим ударам подвергался вращающийся цилиндрический образец с надрезом. В результате анализа экспериментальных данных Стентона и Берстау, Мак-Адама и других в свое время сложилось убеждение, что «в испытании повторными ударами заключены одновременно элементы двух различных видов испытания: испытания на удар надрезанных образцов и испытания на обыкновенную усталость» [4] и что испытания на повторно-переменный ударный изгиб не дают ничего нового по сравнению с этими двумя видами испытаний. Кроме того, предел ударной усталости выражался не через напряжение, возникающее в образце при ударе, а через энергию одного удара, что исключало возможность сравнения с соответствующими данными для статической усталости. Все это привело к тому, что ударно-усталостные испытания были прекращены.

Однако применение высоких скоростей и давлений в современной технике, в том числе угольной и горнорудной, заметно расширило номенклатуру деталей машин, воспринимающих динамические нагрузки в форме многократных ударов. Поэтому ранее сложившиеся взгляды на испытания повторными ударами

были подвергнуты критике и экспериментальной проверке. Несмотря на сложность и долговременность, эти испытания начали возрождаться.

В разработке методики, в экспериментально-теоретическом обосновании испытаний металлов повторными ударами (изгиб, растяжение, сжатие), а также в изучении процесса распространения ударно-усталостной трещины видное место принадлежит проф. А. И. Лампси.

Выступая против односторонности при оценке воздействия на деталь многократных ударов проф. А. И. Лампси [9] пишет: «...очень большое число деталей машин и инженерных конструкций подвергается при знакопеременных напряжениях повторным ударам большого импульса и высокой частоты, а между тем при постановке испытания и учете условий действия переменных напряжений на материал или на деталь конструкции указанные повторные удары не учитываются», хотя эти удары в значительной мере изменяют характер действия переменных нагрузок.

Применительно к анализу и способам устранения причин поломки деталей угольных машин можно сказать, что имеется определенная тенденция к использованию достижений методов поверхностного упрочнения [1, 2]. Однако эти методы целесообразны и эффективны в том случае, когда полностью исчерпаны широкие возможности термической обработки для повышения сопротивления данной стали многократным ударам. Представляется вероятным, что недооценка возможностей термообработки может привести к удорожанию машин без существенного увеличения срока их службы. Поэтому введение испытания сталей повторными ударами диктуется практической потребностью угольного машиностроения.

Существует мнение, что если для данной стали получено высокое значение ударной вязкости, то деталь, изготовленная из этой стали, будет хорошо сопротивляться многократным ударам. Иначе говоря, механической характеристике стали при однократном ударе — ударной вязкости, приписывается универсальность. По-видимому, на этой основе существует стремление применять сталь в нормализованном состоянии, так как она имеет большую ударную вязкость по сравнению с ударной вязкостью той же стали после закалки и высокого отпуска (улучшение).

Проф. Г. И. Погодин-Алексеев [10] отмечает, что к материалу деталей, работающих на удар, помимо высокой способности поглощать кинетическую энергию, предъявляется также требование высокой поверхностной твердости, которая позволяет детали противостоять локальным деформациям в точке удара. Иными словами, стойкость стальных деталей при ударе не может определяться только значением ударной вязкости. При возрастании вязкости падает значение твердости, т. е. уменьшает-

ся сопротивление пластическому деформированию детали и, наоборот, — увеличение поверхностей твердости детали (особенно цементированной). может привести к исчерпанию пластичности и ударной вязкости и эта деталь будет хрупко разрушена.

Экспериментальные данные по исследованию ударной усталости немногочисленны. Проф. Н. Н. Давиденкову и Е. И. Беляевой [8] удалось, используя успехи тензометрии, измерить в напряжениях предел ударной усталости для некоторых сталей при различных термообработках и сравнить его со статическим пределом усталости тех же сталей.

Н. Ф. Лашко [11] исследовал на повторно-переменный ударный изгиб алюминиевый литейный сплав АЛ7. Определялись ударная вязкость и число ударов до разрушения образца в за-

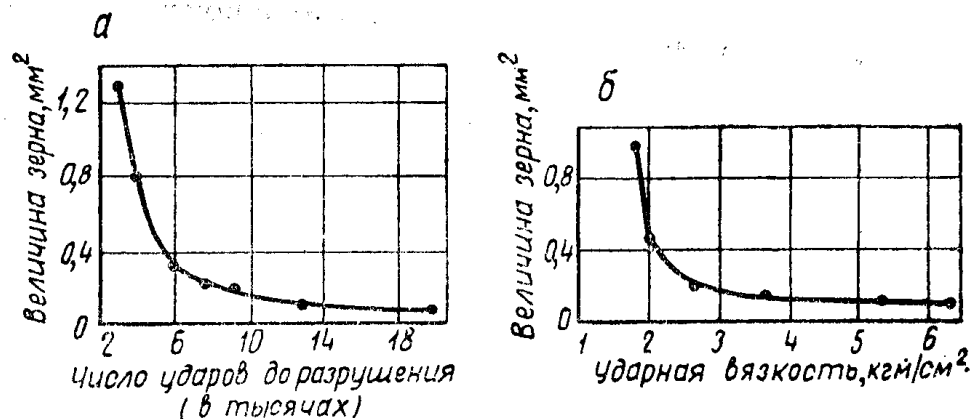


Рис. 1. Влияние величины зерна алюминиевого литейного сплава АЛ7 на число повторных ударов до разрушения (а) и на ударную вязкость при однократном ударе (б) [11].

висимости от величины зерна сплава. Соответствующие графики приведены на рис. 1. Характер изменения указанных величин с изменением размера зерна является почти сходным между собой. Заметим, что при проведении испытаний автор наблюдал значительный разброс данных: по ударной вязкости в пределах от 1,85 до 6,31 кгм/см², по числу ударов до разрушения — от 3840 до 17 970.

Проф. Я. Б. Фридман [12], ссылаясь на приведенные графики Н. Ф. Лашко, пишет: «Окончательный излом образца, в котором уже образовалась усталостная трещина при нагружении повторными ударами, также зависит от величины ударной вязкости: чем выше эта последняя, тем дольше будет работать материал с развивающейся в нем трещиной усталости».

Методика и результаты исследования

1. Постановка задачи. Непосредственным поводом к проведению исследования явились поломки стволов отбойных молотков при эксплуатации их на некоторых шахтах и рудни-

ках (Караганда, Пятихатка). На рис. 2 представлена часть разрушенных стволов. Как видно, трещины зарождались в наиболее ослабленной части ствола по резьбе там, где высверлены отверстия.

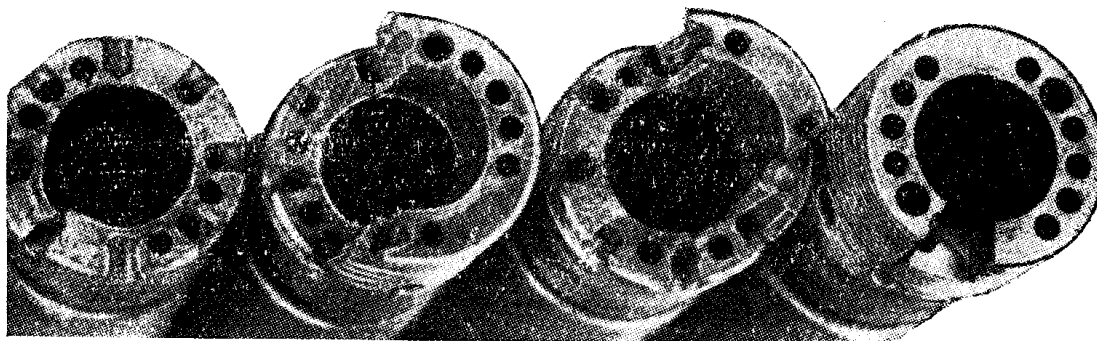


Рис. 2. Стволы отбойных молотков, разрушенные при эксплуатации.

Результаты анализа изломов стволов свидетельствуют о том, что мы имеем дело с ударно-усталостным разрушением. Микроисследования показали, что поломанные стволы имеют крупнозернистую структуру, соответствующую № 1—2 по шкале зернистости. Микроструктура участка, прилегающего к зоне разрушения ствола, приведена на рис. 3.

В подобных условиях нагружения работают не только стволы, но и ряд других деталей угольных машин. Таким образом, выяснение связи между размерами зерна и сопротивлением стали ударно-усталостному разрушению является задачей, имеющей большое значение для горного и других видов машиностроения.

Кроме того, важным вопросом является выяснение целесообразности проведения операции улучшения вместо нормализации деталей, подвергающихся многократно-ударному нагружению.

2. Методика и результаты исследования. Из стали 45 были изготовлены стандартные образцы с надрезом

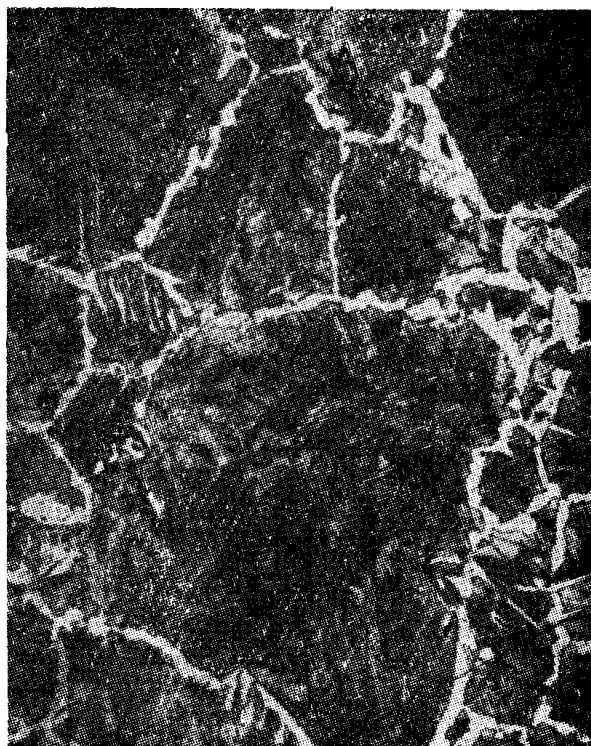


Рис. 3. Микроструктура участка, прилегающего к зоне излома ствола, $\times 100$.

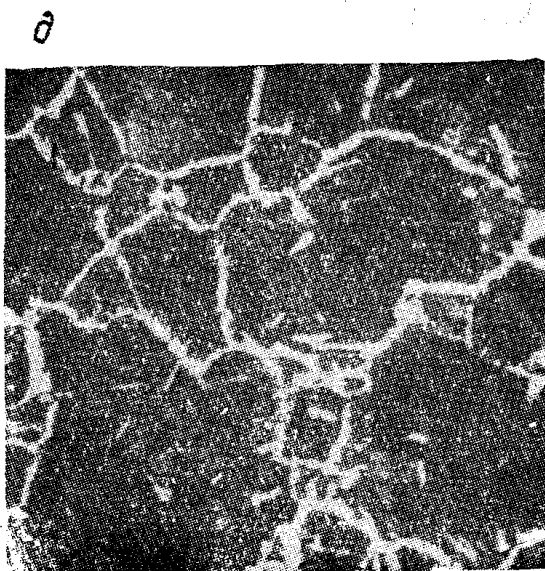
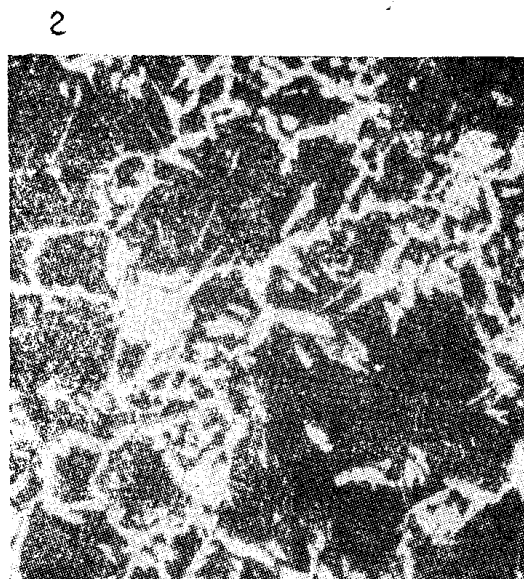
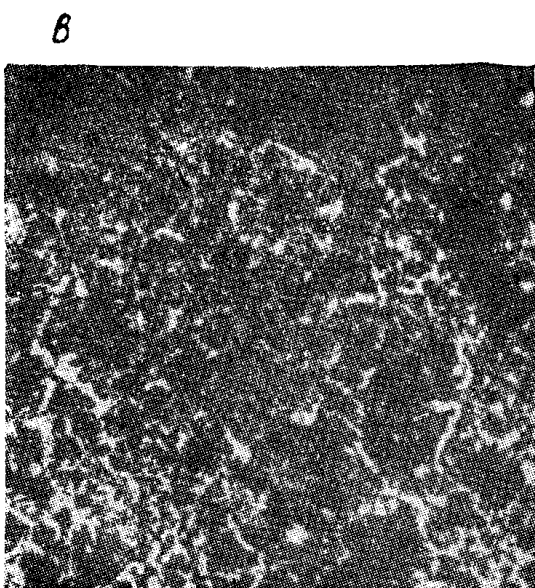
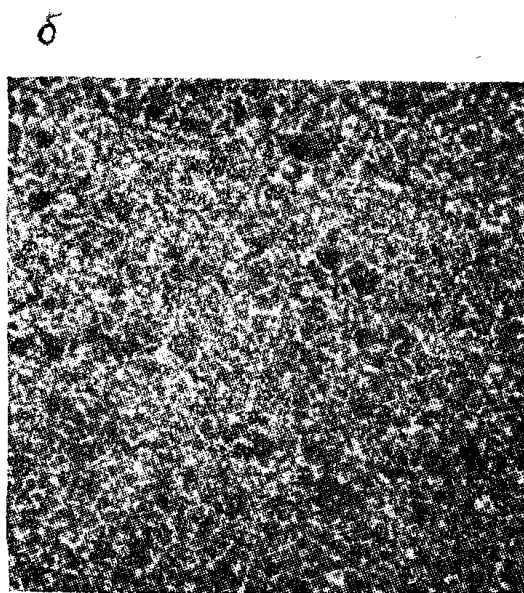
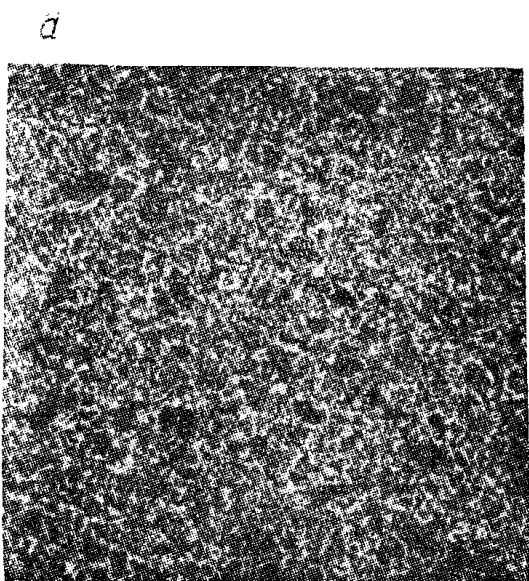


Рис. 4. Микроструктуры образцов из стали 45 нормализованных при температурах:

a—820°; *б*—870°; *в*—900°; *г*—920°;
д—1000°, $\times 100$.

типа Менаже (размер $10 \times 10 \times 55$ мм, радиус закругления надреза $r = 1$ мм) для определения ударной вязкости.

С целью получения различного размера зерна образцы были нормализованы с температур: 820, 870, 920 и 1000°. В связи с резким падением ударной вязкости в интервале температур 870—920° был произведен контрольный опыт для температуры нормализации 900°. Для каждой температурной точки было взято 3 образца. Образцы с чугуной стружкой нагревались в муфельной электропечи с выдержкой 2 часа. После охлаждения на воздухе образцы испытывались на маятниковом копре МК-30. Твердость измерялась на приборе Роквелла (шкала H_{R_B}). Кроме того, из каждой тройки образцов приготавливался микрошлиф для микроанализа и определения среднего размера зерна. Это определение производилось методом секущих [13, 14]. Микрофотографии образцов, нормализованных при различных температурах, представлены на рис. 4.

Из этой же стали 45 были выточены цилиндрические образцы 10×136 мм. Эти образцы (по 3 шт. для каждой температурной точки) были нормализованы по тем же режимам, как и образцы для испытания на ударную вязкость. После нормализации все образцы шлифовались до окончательного размера. Из каждой тройки образцов изготовлялся микрошлиф для контроля микроструктуры, размера зерна и твердости. Испытания на повторно-ударный изгиб производились на ударно-усталостной машине конструкции проф. А. И. Лампси и инж. В. Н. Полюбина. Схема нанесения ударов и крепления неподвижного образца приведена на рис. 5. Результаты испытаний приведены в табл. 1 и 2, по данным которых построены кривые (рис. 6).

Таблица 1

Температура нормализации стали 45, °С	Ударная вязкость a_K кгм/см ²		Твердость H_{R_B} кг/мм ²	Размер зерна мк
	частное значение	среднее		
820	23,2 24,1 25,1	24,1	88	17
870	21,8 22,6 19,1	21,2	88	27
900	21,2 20,2 18,8	20,1	89	50
920	11,5 10,5 9,3	10,1	88	123
1000	8,1 6,8 6,4	7,1	88	200

Таблица 2

Температура нормализации стали 45, °С	Число ударов до раз- рушения образца	Среднее число ударов до разрушения образца
820	30500 22500 20500	24500
870	23000 19000 19500	20500
900	— 18000 16000	17000
920	12500 — 18000	15250
1000	11000 11500 12000	11500
Закалка с 820° в воду, отпуск 600°, выд. 30 мин. $H_{RB}=102 \text{ кг/мм}^2$, $a_K=$ $=11 \text{ кгм/см}^2$	46000 50000 113000	69600

3. Обсуждение результатов. На фотографиях изломов образцов после испытания на ударную усталость (рис. 7) видно, что плоскости изломов имеют две ясно выраженные зоны: зону развития усталостной трещины (мелкозернистая) и зону окончательного разрушения (крупнозернистая). Соотношение размеров зон у образцов с различной зернистостью не одинаково. У образцов, нормализованных с температуры 820°, зона развития усталостной трещины занимает примерно 50% площади всего сечения; у образцов, нормализованных с температуры 870°, она несколько меньше, а у образцов, нормализованных с 1000°, эта зона составляет всего около 15—18% площади сечения.

Размеры усталостных зон хорошо согласуются с результатами испытаний образцов с подобными структурами на ударную вязкость. При одной и той же энергии удара, при которой производились испытания на ударную усталость, окончательное разрушение мелкозернистых образцов, естественно, должно произойти позднее, чем крупнозернистых, т. е. после большего числа ударов, так как мелкозернистые образцы обладают более высокой ударной вязкостью.

Чтобы сопротивляться окончательному разрушению при данной энергии удара, достаточна меньшая часть сечения, оставшаяся от развивающейся усталостной трещины. Это не значит, конечно, что число ударов до разрушения образца всегда находится в однозначной зависимости от ударной вязкости. Как видно из графика рис. 6, кривые зависимости числа ударов до разрушения и ударной вязкости от размера зерна имеют почти одинаковый характер, так как твердость образцов с различным размером зерна остается неизменной. Эти результаты подтверждают положение, ранее высказанное одним из авторов [15], о том, что сопротивление ударно-усталостному разрушению определяется, в первом приближении, соотношением двух механических характеристик материала: твердости и ударной вязкости. В данном случае твердость остается постоянной, следовательно, сопротивление стали ударно-усталостному разрушению

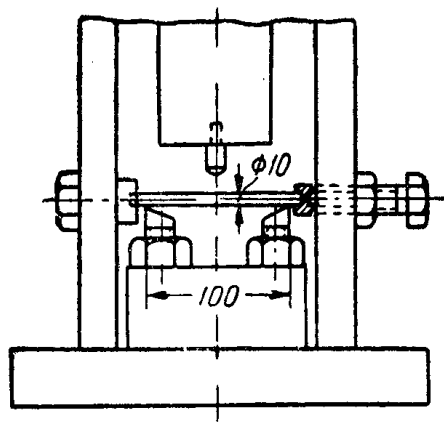


Рис. 5. Схема нагружения неподвижного образца повторными ударами при изгибе.

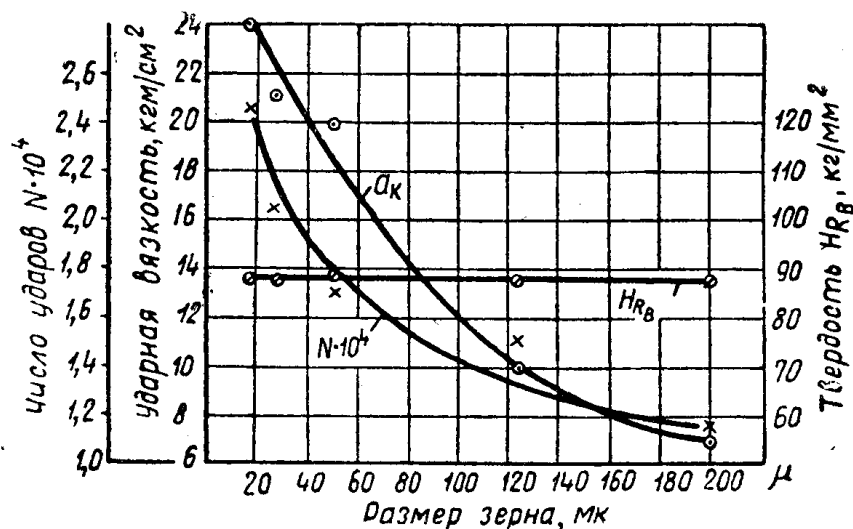


Рис. 6. Изменение ударной вязкости a_K и числа ударов до разрушения образцов из нормализованной стали 45 в зависимости от изменения размера зерна.

должно зависеть, главным образом, от величины ударной вязкости.

Образцы, подвергнутые улучшению (табл. 2), имеют значительно более высокое сопротивление ударно-усталостному разрушению при той же энергии удара, хотя ударная вязкость этих образцов ниже, чем у нормализованных. Объяснение этому явлению вытекает из ранее высказанного положения: несмотря на

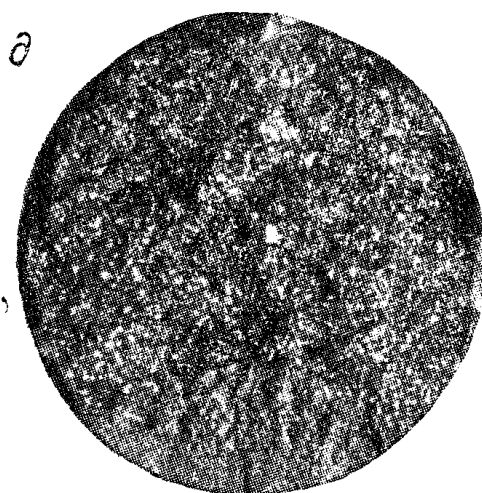
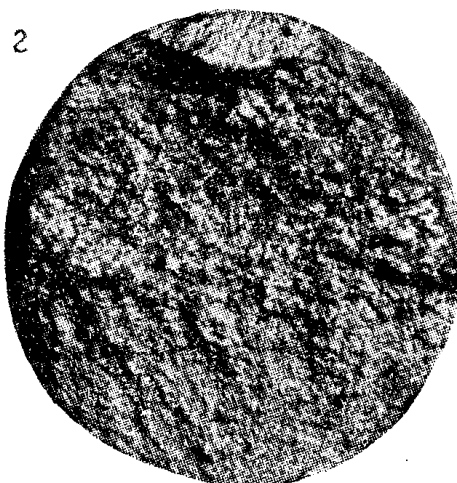
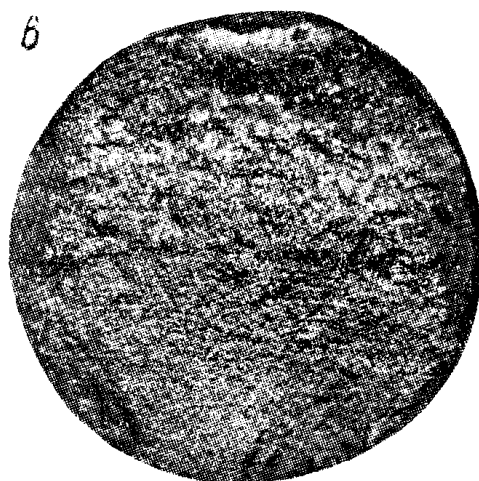
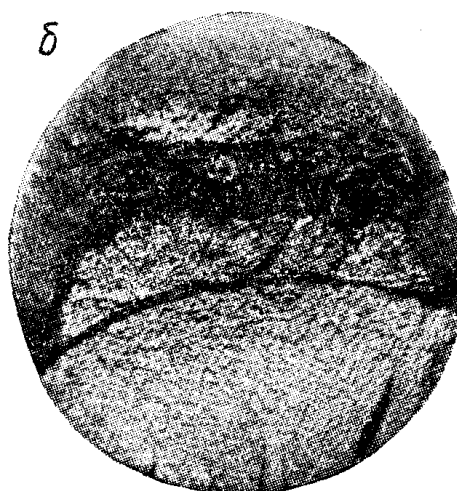
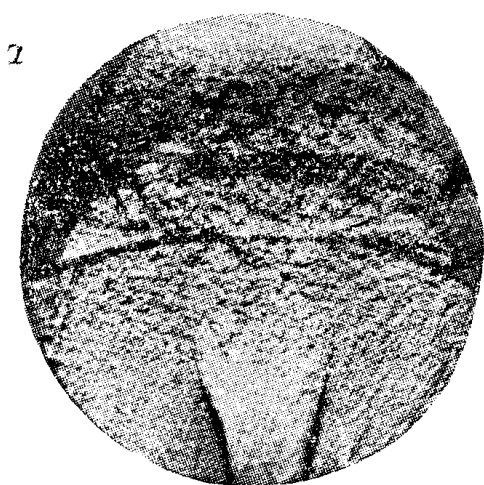


Рис. 7. Изломы образцов после испытания повторными ударами. Температуры нормализации стали:
 а—820°; б—870°; в—900°; г—920°;
 д—1000°, $\times 5$.

понижение ударной вязкости, более высокая твердость дает более высокую стойкость стали при ударно-усталостном разрушении образца. Излом улучшенного образца показан на рис. 8. Зона распространения усталостной трещины у этого образца

Рис. 8. Излом улучшенного образца из стали 45 после испытания повторными ударами. Закалка с 820° в воду, отпуск при 600° , выдержка 30 мин., $\times 5$.



находится с двух противоположных сторон и занимает около 70% всей площади сечения.

ВЫВОДЫ

1. Сопротивление ударно-усталостному разрушению стали 45 значительно снижается с увеличением размера зерна, что вызывает необходимость нормирования величины зерна в стали при изготовлении ряда деталей.

2. Сопротивление ударно-усталостному разрушению у нормализованной стали 45 имеет примерно такой же характер зависимости от размера зерна, как и ударная вязкость.

3. Экспериментальные данные подтверждают ранее выдвинутое положение о том, что сопротивление ударно-усталостному разрушению зависит, в первом приближении, от соотношения двух механических характеристик — твердости и ударной вязкости стали.

4. Улучшение стали 45 значительно повышает ее стойкость против ударно-усталостного разрушения по сравнению с нормализацией. Несмотря на некоторое ухудшение обрабатываемости резанием в этом случае, улучшение должно быть широко рекомендовано как средство повышения долговечности деталей машин ударного действия.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. М. Тененбаум. Основные виды разрушения деталей угольных машин. Углетехиздат, 1956.
2. М. М. Тененбаум. Вопросы повышения долговечности деталей угольных машин. ЦИТИ, Углетехиздат, 1956.
3. Ф. Ф. Витман и Н. Н. Давиденков. Механический анализ ударной хрупкости. ЖТФ, т. 7, в. 4, 1937.

4. Н. Н. Давиденков. Динамические испытания металлов ОНТИ, 1936.
 5. Н. Н. Давиденков. Проблема удара в металловедении. АН СССР, 1938.
 6. Н. Н. Давиденков. Усталость металлов. АН УССР, Киев, 1949.
 7. Н. Ф. Болховитинов. Величина зерна и свойства стали. Металлургиздат, 1943.
 8. Н. Н. Давиденков и Е. И. Беляева. Исследование ударной усталости. Металловедение и обработка металлов, № 11, 1956.
 9. А. И. Лампси. Исследование форм ударно-усталостных изломов: Труды Тульского механического института, в. 3, 1949.
 10. Г. И. Погодин-Алексеев. Повышение стойкости против разрушения при ударе. Вестник машиностроения, № 2, 1950.
 11. Н. Ф. Лашко. Испытания на повторно-переменный ударный изгиб. Заводская лаборатория, № 5, 1947.
 12. Я. Б. Фридман. Механические свойства металлов. Изд. 2-е, Оборонгиз, 1952.
 13. М. Е. Блантер. Методика исследования металлов и обработки опытных данных. Metallurgizdat, 1952.
 14. С. А. Салтыков. Введение в стереометрическую металлографию. АН Армянской ССР, Ереван, 1950.
 15. Г. В. Топоров. Влияние текстуры и исходных механических свойств на ударную усталость стали 40ХН. Труды СФТИ при ТГУ, в. 34, Томск, 1955.
-

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть	По вине
13	1 сн.	7-10	T-10	Корр.
14	13 сн.	R-754	RH-754	»
28	1 сн.	$A_y = \frac{mV_6^2}{2}$	$A_y = \frac{mV_y^2}{2}$	Авт.
34	18—20 сн.		2 — диаграмма колебаний корпуса молотка; 3—диаграмма углового перемещения бура; 4—диаграмма давления воздуха в задней полости цилиндра молотка; 5 — диаграмма давления в передней полости;	
35	1 сн.	Scerving Stienze	Serving Science	Авт.
46	14 сн.	изменения	изменении	Ред.
90—91	Рис. 7 и 8	поменять местами, сохранив на месте подрисовочные подписи		Тип.
97	10 сн.	бурильного молотка	автоподатчика	Авт.
107	2—3 сн.	остановки	остановкой	»
156	2 св.	поверхностей	поверхностной	Корр.
166	14 сн.	разбуренным	пробуренным	Авт.
179	9 св.	кинетическую	кинематическую	Корр.
189	5 св.	(59—200 мм)	(50—200 мм)	»
192	10 сн.	расширится	расширителя	Тип.
197	1 св.	кинетики	кинематики	Корр.
198	3—6 св.	Строку пятую читать	после второй строки	Тип.
199	14 сн.	кинетики	кинематики	Авт.
212	12 св.	Л. Б. Левенмон	Л. Б. Левенсон	Авт.
219	3 сн.	$A = a + h . . . + h .$	$A = a + h . . . + h . (16)$	Корр.
223	3 св.	$- \left(30 \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 + 5$	$- 30 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 + 5$	Тип.
224	19—20 св.	увеличилась	увеличивалась	Корр.
229	10 св.	АОФ4-2	АОФ42-2	Авт.
243	11 св.	1, 15	1, 5	Корр.