

0-6.7  
TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED  
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Серия А

№ 90

1957

Р. К. МОЗБЕРГ

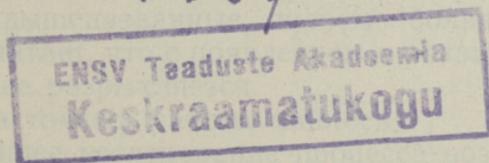
**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ МИКРОСТРУКТУРЫ И  
СВОЙСТВ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПРИ  
ИСПЫТАНИИ НА УСТАЛОСТЬ**

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА  
ТАЛЛИН, 1957



Р. К. МОЗБЕРГ

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ МИКРОСТРУКТУРЫ И  
СВОЙСТВ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПРИ  
ИСПЫТАНИИ НА УСТАЛОСТЬ



ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА  
ТАЛЛИН, 1957



## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПРИ ИСПЫТАНИИ НА УСТАЛОСТЬ

Большое значение при уточнении физической картины развития различных фаз усталостного разрушения имеют микроскопические методы исследования. Данное положение вполне обосновано тем, что метод микроскопических исследований позволяет наблюдать изменения, происходящие в отдельных зернах металла на различных этапах испытания, что особенно важно в связи с резко выраженной локализацией усталостных явлений. Поэтому метод микроскопических исследований может дать ценные сведения о механизме процессов усталости материала.

Несмотря на большое количество работ, проведенных с использованием данного метода исследования, среди которых особенно важными являются исследования Гафа и Хэнсона (1), Н. Н. Афанасьева (2), И. А. Одингга (3), В. И. Беляева и Т. А. Лебедева (4), Б. А. Кузнецова (5) и др., до сих пор нет единой точки зрения на природу процессов, протекающих в отдельных микрообъемах материала, подверженного циклическому воздействию нагрузок.

Всеми вышеприведенными авторами отмечается появление своеобразных полос (линий) на отдельных зернах структуры материала при испытаниях на усталость. Однако, в трактовке природы этих полос имеются принципиальные расхождения. Часть исследователей (1, 2) считают их полосами сдвигов, другие (4) — микротрещинами.

Что касается состояния материала в зернах, где обнаруживаются вышеназванные полосы, большинство авторов (2—4) считает, что с появлением и развитием их материал все более разрушается.

Задачей настоящей работы явилось:

а) дальнейшее исследование процесса возникновения и последующего развития полос усталости на зернах ферритной структурной составляющей низкоуглеродистой стали;

б) методом измерения микротвердости и дополнительными механическими испытаниями выявление состояния материала в ферритных зернах на различных этапах воздействия циклических нагрузок как при напряжениях выше, так и ниже предела усталости.

### МАТЕРИАЛ И ОБРАЗЦЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала для исследования была выбрана малоуглеродистая сталь 20 с содержанием углерода 0,19%.

Заготовки для образцов вырезались из прутков диаметром 16 мм и подвергались термической обработке по следующему режиму: нормализация с температуры 860°C, последующий отпуск при температуре 650°C и охлаждение с печью для снятия термических напряжений (что было необходимо для дополнительного использования этих образцов при рентгеновских исследованиях).

Из подобным образом обработанных заготовок изготавливались образцы, размеры и вид которых представлены на рис. 1А.

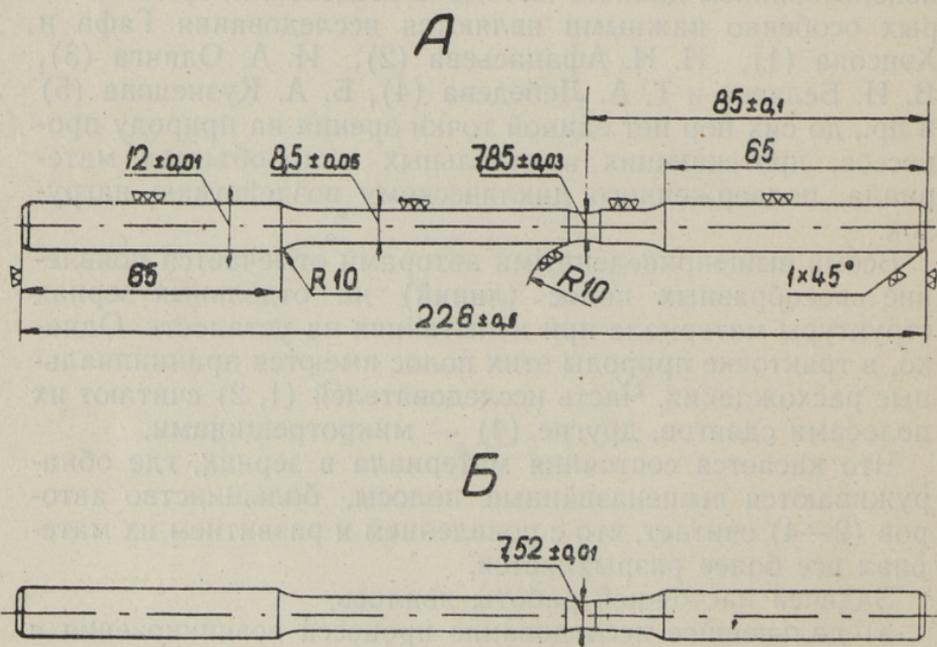


Рис. 1. Образец для испытания на усталость.

А — после механической обработки. Б — после электрополировки.

Выточка радиусом 10 мм на расстоянии 85 мм от конца образца делалась для того, чтобы фиксировать исследуемый участок с максимальными напряжениями от действия циклических нагрузок.

Для удаления наклепанного от механического шлифования слоя место выточки подвергалось электрополировке. Толщина съема металла  $0,165 \pm 0,02$  мм при электрополировке, как показали измерения микротвердости и ширины линии  $(310) K \frac{\alpha_1}{2}$  рентгенограммы образца, обеспечивало полное удаление наклепанного слоя. Диаметр образца в середине выточки при электрополировке доводился до  $7,52 \pm 0,01$  мм и контролировался посредством малого инструментального микроскопа.

Окончательный вид образца после электрополировки приведен на рис. 1Б.

Для выявления микроструктуры в месте выточки образцы подвергались химическому травлению 4% раствором азотной кислоты в этиловом спирте.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

### 1. Испытание образцов на усталость

Для создания в образцах циклически действующих напряжений была использована машина типа НУ, создающая на вращающийся образец знакопеременный круговой изгиб. Установка образца в машине, а также испытания проводились в соответствии с инструкциями по эксплуатации данного типа машин. Для установления предела усталости использованных образцов была построена кривая усталости, приведенная на рис. 2, откуда видно, что  $\sigma_{-1} = 23,4 \text{ кг/мм}^2$ .

Исследования структурных изменений в образцах от действия циклических нагрузок проводилось в основном при двух напряжениях: на 20% выше предела усталости ( $\sigma = 28,4 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$ ) и на 5% ниже предела усталости ( $\sigma = 22,2 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$ ).

Общая долговечность образца, при испытаниях выше предела усталости, разбивалась на 4—5 интервалов, каждый из которых составлял в среднем  $80 \div 100$  тыс. циклов.

Исследования изменений в микроструктуре и микротвердости проводились после каждого этапа испытания.

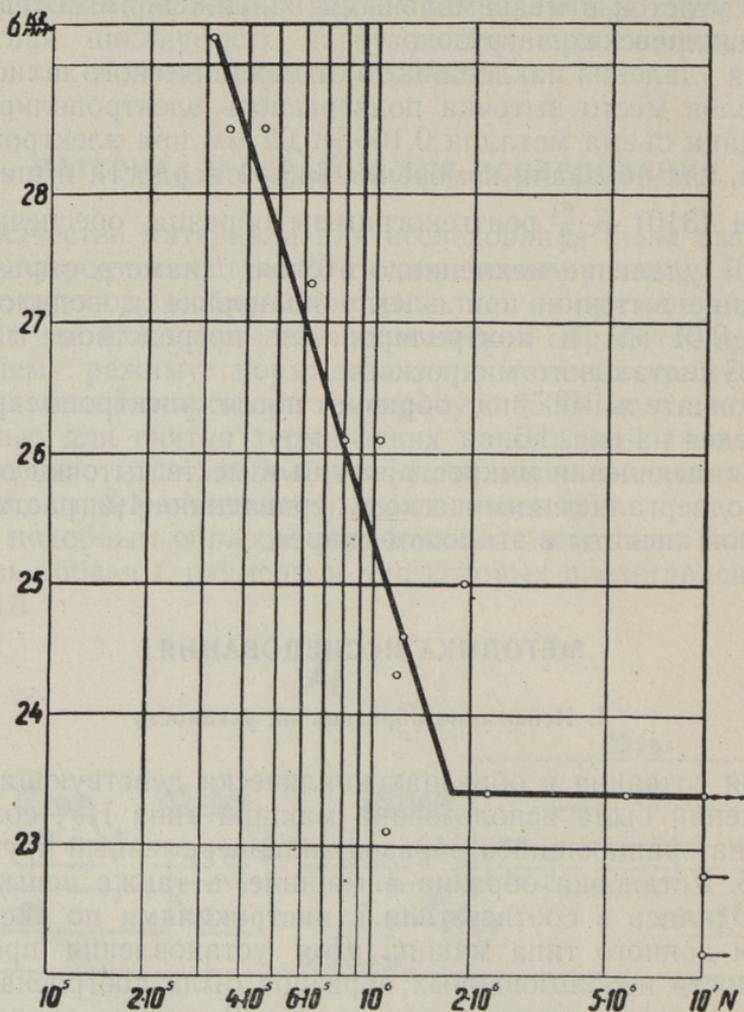


Рис. 2. Кривая усталости для стали 20.

Для выяснения числа циклов нагружения, обуславливающего появление первых полос на ферритных зернах, микроскопические наблюдения велись через 600—900 циклов, пока не обнаружались первые признаки структурных изменений. При испытаниях ниже предела усталости наблюдения велись последовательно после  $1,5 \div 2,5$  млн. циклов. Общая длительность действия циклических нагрузок в этих случаях —  $10 \div 13$  млн. циклов.

Т. к. одной из задач исследования являлось также наблюдение за развитием усталостной микротрещины, важно было обнаружить трещину на начальных стадиях ее развития.

Для этой цели было использовано приспособление для непрерывного наблюдения за изменением прогиба образца в процессе испытания с точностью до  $2,5 \mu$ . Измерительное устройство работало по принципу зеркально-механического тензомера, подробное описание устройства которого приведено в работе Ю. К. Мазинга (11), разработавшего конструкцию данного прибора. Использование этого устройства позволяло прекратить испытание, когда протяженность трещины составляла  $10 \div 15$  диаметров зерен, что соответствовало  $0,1 \div 0,2$  мм.

## II. Измерение микротвердости

Учитывая, что вопросу исследования изменения микротвердости при усталости посвящено еще мало работ, дальнейшее освещение этого вопроса может быть весьма полезным для вскрытия физической сущности процессов, сопровождающих усталостные испытания.

Измерение микротвердости ферритной структурной составляющей материала проводилось на приборе ПМТ-3, для чего была изготовлена специальная оправка с упором для образца, позволяющая точно фиксировать исследуемый участок образца под объективом прибора при повторных исследованиях.

Нагрузка на индентор была выбрана 5 г, чтобы получить отпечатки, глубина которых не простирается, в основном, за пределы зерен, расположенных непосредственно на поверхности образца и, в силу этого, подверженных максимальному воздействию напряжений от циклических нагрузок.

При испытании твердости были учтены результаты ряда опытных исследований о влиянии различных факторов на значение микротвердости (6,7). Так как разброс данных отдельных замеров твердости был значителен, для получения более достоверных значений приходилось при каждом испытании производить от 50 до 100 замеров, на основе которых методом сглаживания (8) строились частотные кривые распределения твердости. Интервал значений твердости, соответствующий максимуму кривой распределения,

принимался за твердость исследуемой ферритной структурной составляющей.

Учитывая, что состояние твердости в ферритных зернах с полосами сдвигов и без таковых различно, приходилось проводить раздельно замеры в зернах без полос и с полосами, когда последние обнаруживались после того или иного числа циклов работы образца.

С самого начала проведения опытных исследований и измерения микротвердости было обнаружено, что вид отпечатков от отдельных измерений получается различный: в некоторых зернах грани отпечатков были выпуклые, в других — вогнутые или прямые. Учитывая факт, что вид отпечатков зависит от степени пластичности\*) испытуемого материала, как явствует из работы В. К. Григоровича (9), а также то обстоятельство, что количественное соотношение между отпечатками различных видов менялось в процессе работы образца, была проведена, одновременно с измерением диагонали отпечатка, также и условная классификация отпечатков по «степени вогнутости граней». Отпечатки, имеющие все или три грани вогнутые, характеризовались как «вогнутые»; отпечатки со всеми или тремя выпуклыми гранями характеризовались как «выпуклые»; остальные по виду отпечатки считались «квадратными».

Как впоследствии выяснилось, подобная классификация отпечатков оказалась весьма полезной и позволила сделать некоторые дополнительные выводы о процессах, происходящих в отдельных микрообъемах металла при испытании на усталость.

### III. Микроскопические исследования структурных изменений при усталости

Исследование микроструктуры проводилось одновременно с измерением микротвердости на приборе ПМТ-3 при  $458\times$  увеличении. Когда необходимо было иметь боль-

\* Под термином «степень пластичности» в настоящей работе подразумевается сравнительная способность материала зерна к пластической деформации, устанавливаемая по форме отпечатка от измерения микротвердости.

Так как в работе (9) установлено, что форма отпечатка с вогнутыми гранями соответствует большой зоне деформированного металла около отпечатка, а с выпуклыми гранями — малой, то по изменению относительного количества отпечатков той или иной формы проводилось суждение об изменении пластичности металла на различных этапах усталости.

шие увеличения, использовался металломикроскоп МИМ-8. Наибольшие увеличения, которые применялись при этом как для визуальных наблюдений, так и при фотографировании, находились в пределах  $600\div 700\times$ . Так как в процессе исследования необходимо было делать множество снимков, то в целях ускорения процесса съемки для прибора ПМТ-3 была сконструирована новая головка с двумя тубусами. Один тубус служил для установки на нем измерительного микрометра для измерения диагоналей отпечатков; другой — для узкоплочного фотоаппарата типа «Зенит». Переналадка с измерения отпечатков на фотографирование осуществлялось простым поворотом кольца оправки с тубусами на  $110^\circ$ .

При микроскопических исследованиях проводилась не только качественная оценка изменений, протекающих в структуре металла с возрастанием числа циклов действия знакопеременных нагрузок, но и попытка количественной оценки некоторых изменений. В частности такого рода исследования проводились по учету количества зерен феррита, на которых в процессе испытания на усталость образца появлялись полосы (линии) сдвига. Для этой цели после каждого этапа испытания подсчитывалось число зерен феррита с полосами и без таковых, которые пересекались перекрестными нитями окуляра микрометра прибора ПМТ-3 в нескольких случайных участках исследуемой поверхности образца. В среднем исследовалось около 300—400 зерен. По полученным данным подсчитывалось относительное количество зерен феррита с полосами от усталости на каждом этапе испытания.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### А. Микроструктурные исследования

Число циклов нагружения, вызывающие появление первых структурных изменений в наших условиях исследования (увеличение порядка  $500\times$ ) составляло при напряжениях на 20% выше предела усталости  $2\div 3$  тыс. циклов. При напряжениях на 5% ниже предела усталости первые признаки структурных изменений были обнаружены после нескольких сот тысяч циклов работы образца от начала испытания.

Результаты исследования изменения относительного

количества зерен феррита, на которых появляются линии и полосы от усталости с увеличением числа циклов испытания при напряжении  $\sigma = 1,2\sigma_{-1}$  представлены на рис. 3.

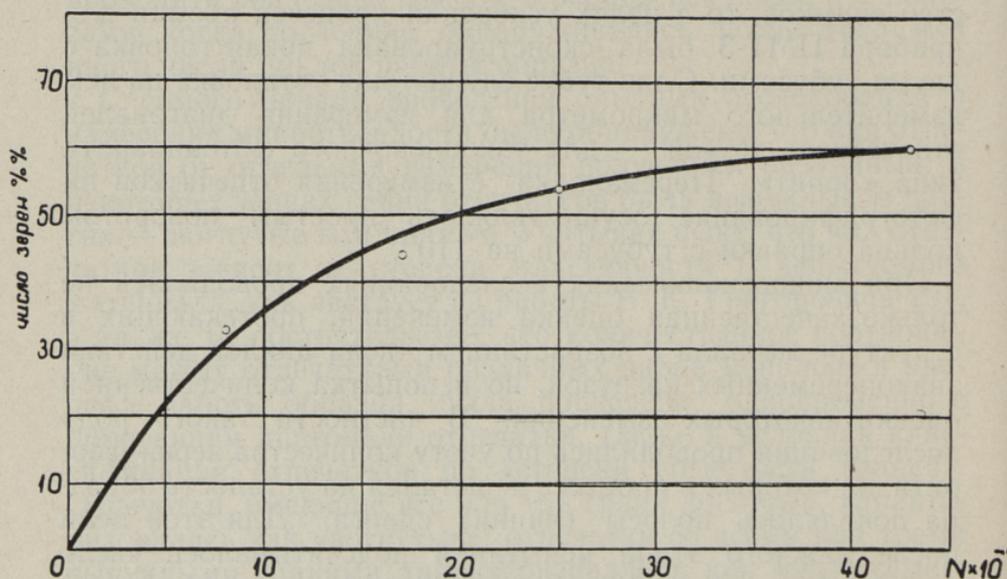


Рис. 3. Изменение относительного числа ферритных зерен с полосами сдвига в зависимости от числа циклов нагружения,  $\sigma = 1,2\sigma_{-1}$ .

Из этой кривой видно, что наиболее интенсивно процесс идет на первых этапах нагружения, постепенно затухая к концу испытания, и что число зерен, покрытых полосами к концу испытания достигает 60%. В других образцах эта цифра колебалась в пределах  $55 \div 75\%$ .

В принципе аналогично протекает процесс развития полос на ферритных зернах структуры и у образцов, испытанных ниже предела усталости. Количество зерен, покрытых полосами, к 10 млн. циклов испытания ( $\sigma = 0,95 \sigma_{-1}$ ) составляло 25—40% от всех ферритных зерен.

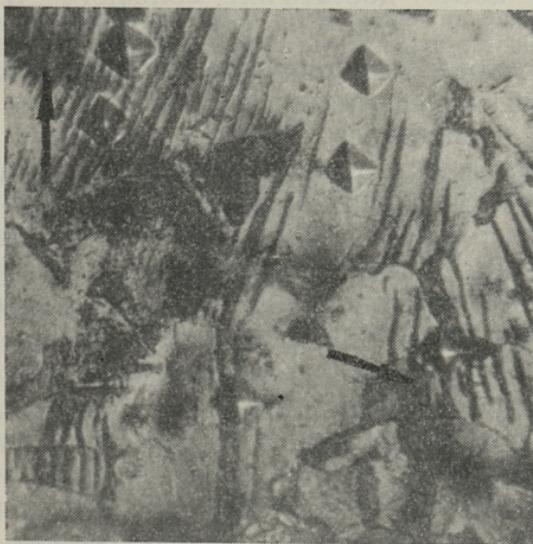
Исследование кинетики зарождения полос на зернах феррита позволило установить два, внешне отличных друг от друга механизма их появления.

Возникновение полос по первому типу заключалось первоначально в некотором потемнении отдельных участков ферритного зерна. Увеличение числа циклов приводило к появлению на этих потемневших участках полос, резкость

очертаний которых возрастала с ростом числа циклов испытания.



А — после 30 тыс. циклов.



Б — после 410 тыс. циклов.

Рис. 4. Изменение микроструктуры образца при циклическом воздействии нагрузок в зависимости от числа циклов нагружения,  $\sigma=1,2\sigma_{-1}$ ,  $\times 650$ .

Дальнейшее увеличение числа циклов приводило к удлинению и расширению полос вплоть до того, что в отдельных участках полосы сливались, образуя темные сплошные массивы. При тщательном изучении отдельных зерен с полосами удавалось наблюдать в некоторых случаях появление на них дополнительных резких тонких, похожих на микроскопические трещинки, линий, идущих вдоль направления полос сдвига. Такие случаи имели место преимущественно после  $200 \div 250$  тыс. циклов нагружения при перегрузке на 20% выше предела усталости и после  $5 \div 7$  млн. циклов при напряжениях на 5% ниже предела усталости.

В некоторых случаях наблюдались изменения другого характера (рис. 4).

На отдельных ферритных зернах вначале появлялись тонкие линии, весьма сходные с линиями сдвига от обычной статической пластической деформации (рис. 4А). Увеличение числа циклов приводило к появлению новых линий и к дальнейшему развитию ранее появившихся, в основном в сторону их расширения, вплоть до образования сплошных, темных массивов от слияния их друг с другом (рис. 4Б), аналогично тому, как это имело место и в первом случае после достаточно большого числа циклов нагружения.

Для того, чтобы установить наличие изменений в структуре металла от испытания на усталость под поверхностным слоем, проводилось удаление металла с поверхности образца путем электрополировки. На рис. 5 представлена структура в месте шейки образца после удаления поверхностного слоя толщиной 0,06 мм, что соответствует 2,5—3,5 диаметрам зерна. Как видно, на отдельных зернах наблюдаются достаточно резкие, прямые параллельные линии, которые выявились после травления.

При микроскопических наблюдениях было также установлено, что в отдельных зернах феррита, покрытых полосами, когда испытание образцов велось при перегрузках, после достаточно большого числа циклов наблюдается эффект окрашивания в цвета от васильково-синего до синесерого. Объяснить подобное явление повидимому можно тем, что в некоторых участках структуры имеют место повышения температуры, достигающие по меньшей мере до  $300\text{—}320^\circ\text{C}$  и вызывающие появление соответствующих цветов побежалости. Характерно, что средняя температура

образцов в процессе испытания незначительно превышала (порядка 20—30°C) температуру окружающей атмосферы. При испытаниях ниже предела усталости появление подобных окрасок на зернах феррита наблюдалось редко.



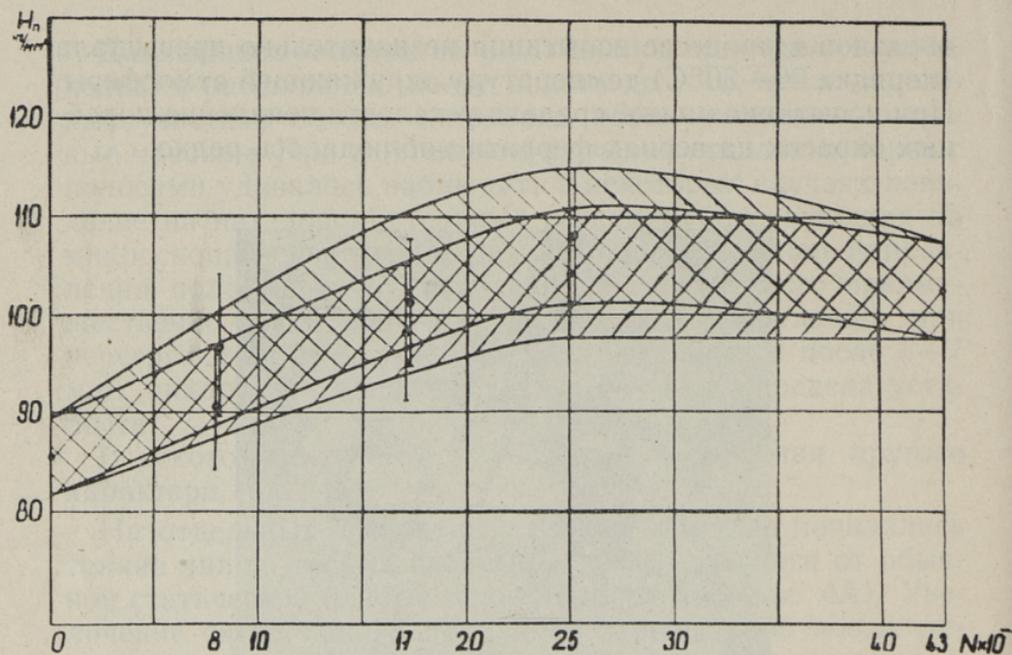
Рис. 5. Микроструктура образца после удаления электрополировкой поверхностного слоя толщиной 0,06 мм; предварительное нагружение при напряжении  $\sigma=0,95\sigma_{-1}$  на 10 млн. циклов,  $\times 650$ .

#### Б. Результаты исследования изменения микротвердости и дополнительных механических испытаний

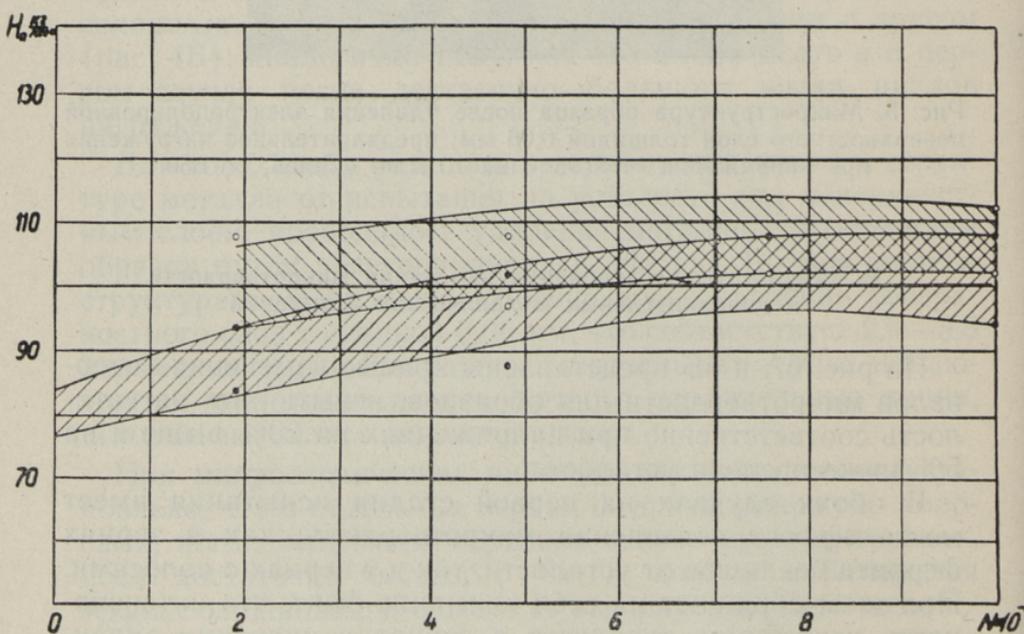
На рис. 6А и 6Б представлены кривые изменения интервалов микротвердости для образцов, испытанных на усталость соответственно при напряжениях на 20% выше и на 5% ниже предела усталости.

В обоих случаях на первой стадии испытания имеет место эффект повышения микротвердости как в зернах феррита без полос от усталости, так и в зернах с полосами. При этом обращает на себя внимание факт, что интенсивность увеличения твердости в зернах с полосами значительно больше, чем в зернах без полос.

Во второй стадии испытания на усталость при напряжениях выше предела усталости имеет место заметно выраженный эффект уменьшения микротвердости, причем твер-



А — при напряжении  $\sigma = 1,2\sigma_{-1}$ .



Б — при напряжении  $\sigma = 0,95\sigma_{-1}$ .

Рис. 6. Изменение микротвердости зерен феррита с полосами (линиями сдвига (полоса интервала, заштрихованная  $\text{▨}$ ) и без полос (линии) сдвига (полоса интервала заштрихованная  $\text{▧}$ ) в зависимости от числа циклов нагружения.

дость в зернах феррита с линиями и полосами падает интенсивнее, чем в других зернах ферритной структурной составляющей. Характерно, что микротвердость в образцах, испытанных на 5% ниже предела усталости также, начиная с достаточно большого числа циклов ( $4 \div 8$  млн.), обнаруживает некоторую тенденцию к понижению.

Результаты наблюдения за изменением вида отпечатков от измерения микротвердости с увеличением числа циклов испытания для образцов, испытанных выше и ниже предела усталости, представлены соответственно на рис. 7А и 7Б.

Из данных графиков явствует, что:

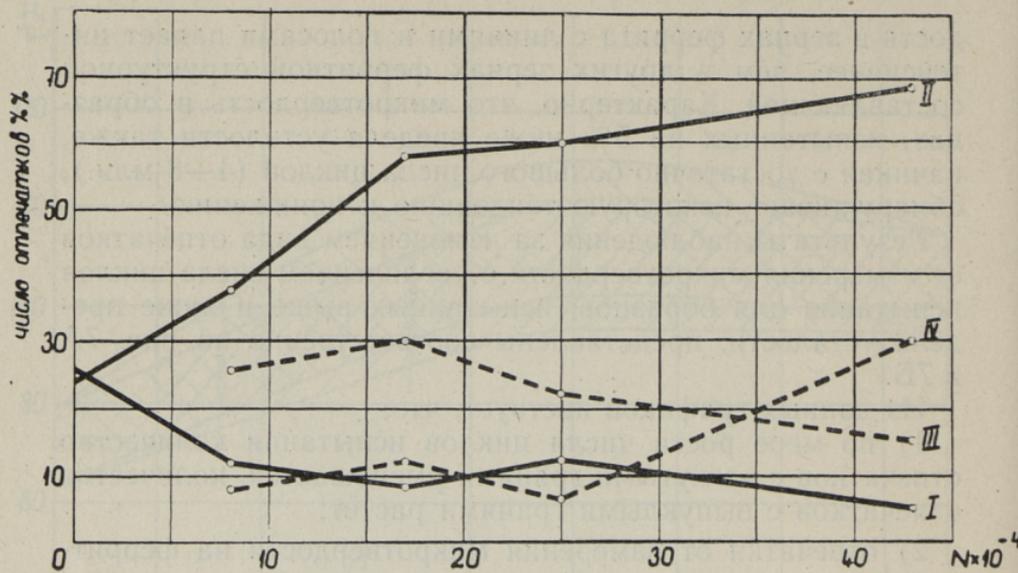
1) по мере роста числа циклов испытания количество отпечатков с вогнутыми гранями уменьшается, количество отпечатков с выпуклыми гранями растет;

2) отпечатки от измерения микротвердости на ферритных зернах с полосами от усталости на первых этапах испытания на усталость имеют преимущественно вогнутые грани; с ростом числа циклов имеет место уменьшение числа последних и увеличение числа отпечатков с выпуклыми гранями;

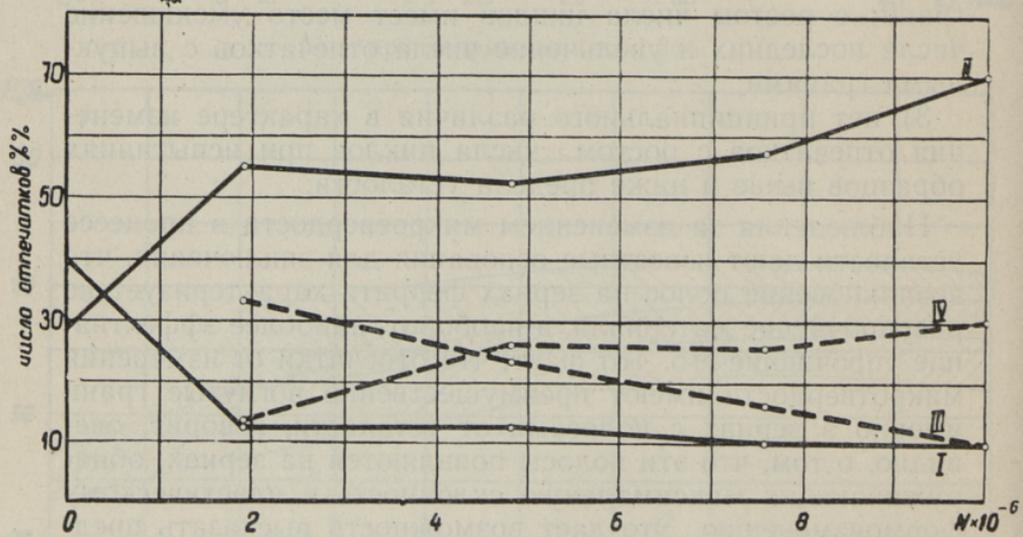
3) нет принципиального различия в характере изменения отпечатков с ростом числа циклов при испытаниях образцов выше и ниже предела усталости.

Наблюдения за изменением микротвердости в процессе усталости дают известные основания для заключения, что возникновение полос на зернах феррита характеризует не разупрочнение материала, а наоборот, наиболее эффективное упрочнение его. Тот факт, что отпечатки от измерения микротвердости имеют преимущественно вогнутые грани именно в зернах с полосами от усталости, говорит, очевидно, о том, что эти полосы появляются на зернах, обнаруживающих максимальную склонность к пластическому формоизменению. Это дает возможность высказать предположение, что наблюдаемые полосы навряд ли являются микротрещинами, появление которых можно было ожидать на зернах хрупких в самом начале испытания или потерявших пластичность от циклического воздействия нагрузок на материал.

Рост числа циклов испытания после достижения максимума упрочнения ведет к дальнейшему разупрочнению, наиболее интенсивно протекающему в зернах, где имело место наличие полос от усталости. О том, что к концу



А — при напряжении  $\sigma = 1,2\sigma_1$ .



Б — при напряжении  $\sigma = 0,95\sigma_1$ .

Рис. 7. Изменение относительного числа различных зернах с отпечатков от измерения микротвердости в ферритных зернах с полосами (линиями) сдвига и без полос (линий) сдвига в зависимости от числа циклов нагружения. Кривая I — отпечатки с вогнутыми гранями в зернах феррита без полос (линий) сдвига; кривая II — отпечатка с выпуклыми гранями в зернах феррита без полос (линий) сдвига; кривая III — отпечатки с вогнутыми гранями в зернах феррита с полосами (линиями) сдвига; кривая IV — отпечатки с выпуклыми гранями в зернах феррита с полосами (линиями) сдвига.

испытания при перегрузках зерна с полосами действительно оказываются наиболее ослабленными, говорит также и то, что усталостная трещина преимущественно проходила по этим зернам вдоль полос. Для дальнейшей проверки наблюдаемого явления были проделаны некоторые дополнительные опыты.

В частности было взято два образца, подвергнутых испытанию на усталость при напряжении на 20% выше предела усталости. Один образец испытывался до числа циклов 130 тыс., что соответствовало восходящей части кривой изменения микротвердости; другой прошел 270 тыс. циклов испытания, что соответствовало началу разупрочнения, судя по кривой изменения микротвердости. Оба образца при рассмотрении под микроскопом обнаружили много зерен с полосами от усталости. Затем образцы были подвергнуты растяжению до остаточной деформации 2—4% и вновь исследованы под микроскопом. На обоих образцах были обнаружены трещины. Для того, чтобы установить преимущественные очаги зарождения трещин, была проведена классификация их по местам залегания. Затем был исследован ряд трещин, случайно попавшихся в поле зрения микроскопа в различных участках шейки образца.

Результаты исследования приведены в следующей таблице:

Характеристика трещин	Обр. № 1 ( $N = 1,30 \cdot 10^5$ )		Обр. № 2 ( $N = 2,7 \cdot 10^5$ )	
	число трещин данного типа	отн. число трещин %%	число трещин данного типа	отн. число трещин %%
Межкристаллические	32	71	9	18
В ферритных зернах без полос сдвига	5	11	2	4
В ферритных зернах с полосами сдвига	2	4,5	35	70
В перлитных зернах	6	13,5	4	8

Данные исследования подтверждают высказанные ранее положение, что полосы на ферритных зернах в начале своего зарождения не являются микротрещинами, в качестве которых они должны были бы раскрыться от действия

усилий, растягивающих образец, а появляются вследствие циклической пластической деформации материала.

Увеличение числа циклов испытания вызывает в этих зернах процессы, приводящие к дальнейшему эффективному их разупрочнению. Поэтому очевидно и трещины, обнаруженные после растяжения второго образца сосредотачиваются в основном в зернах, имеющих на себе полосы от усталости.

После того, как было выяснено состояние материала в ферритных зернах с полосами от усталости на различных этапах испытания, создаются дополнительные предпосылки для выяснения природы этих полос.

На основе микроскопических наблюдений кажется наиболее достоверным считать эти полосы пакетами скольжения, состоящих из тесно примыкающих друг к другу линий скольжения. Расстояние между отдельными линиями настолько мало, что при рассмотрении под микроскопом создается впечатление одной широкой полосы.

Подтверждением высказанного предположения является то, что в отдельных случаях при циклических нагружениях наблюдалось появление линий на зернах феррита, которые вначале имели весьма много общего с обычными линиями скольжения (рис. 4А). Рост числа циклов нагружения приводил к тому, что линии скольжения постепенно расширялись за счет возникновения рядом с ранее образовавшимися новых, в результате чего образовались пакеты скольжения.

Дальнейшее увеличение числа циклов нагружения приводило к образованию между ранее обособленными пакетами скольжения новых групп линий скольжения, что при микроскопических наблюдениях выявлялось в виде образования более или менее однородных, темных, широких массивов от слияния друг с другом ранее обособленных пакетов скольжения (рис. 4Б).

Наблюдения за изменениями в структуре образца под поверхностным слоем после длительного циклического воздействия нагрузок дают некоторые дополнительные сведения о состоянии материала на плоскостях скольжения.

Как известно (3, 10), линии скольжения от статической деформации после переполировки и последующего травления почти никогда повторно не выявляются. То обстоятельство, что при циклическом пластическом деформиро-

вании линий скольжения на некоторой глубине под поверхностным слоем металла после травления выявляются (рис. 5), заставляет предполагать, что материал по плоскостям скольжения находится в каком-то особом состоянии, наименее стойком по отношению к травящему действию реактивов.

Характерно, что выявление линий сдвига после переполровки и последующего травления по данным как наших, так и других исследований (2), происходит после значительного числа циклов нагружения и отсутствует, когда число циклов мало. Это дает основание считать, что обнаруженный эффект не является следствием особенностей линий сдвига от усталости, а вызывается повторными нагружениями, приводящими материал по плоскостям сдвига в состояние повышенной травимости. Причиной данного эффекта следует повидимому считать максимальное нарушение порядка в расположении атомов в узлах кристаллической решетки по плоскостям скольжения от длительного циклического нагружения, что характеризуется нарушением взаимосвязи между отдельными атомами, т. е. разрыхлением материала.

Значительный интерес представляет поведение материала в образцах, испытанных ниже предела усталости. Учитывая, что при напряжении ниже предела усталости образцы из черных металлов при испытании не обнаруживают разрушения, можно было ожидать, что процесс разрыхления в них не будет иметь места и что второй участок кривой изменения микротвердости, показывающий ее снижение, в данном случае будет отсутствовать. Тем не менее исследование микротвердости у образцов, испытанных при напряжениях на 5% ниже предела усталости, показало известную тенденцию к снижению твердости после 4—8 млн. циклов испытания.

Учитывая принципиальную важность положений, вытекающих из результатов исследования микротвердости при напряжении ниже предела усталости, нами были предприняты дополнительные опыты, которые позволили проверить выводы, полученные от измерения микротвердости.

Ряд образцов был подвергнут циклическому воздействию нагрузок при напряжении на 5% ниже предела усталости ( $\sigma = 22,2 \text{ кг/мм}^2$ ) на различное число циклов, (от 1,5 млн. до 13—14 млн.). Каждый из подобным образом обработанных образцов был затем подвергнут испытанию

на усталость при напряжении на 20% выше предела усталости ( $\sigma=28,4$  кг/мм<sup>2</sup>).

Учитывая по данным изменения микротвердости наличие двух эффектов при испытании ниже предела усталости — упрочнения в начале процесса испытания и разупрочнения при достаточно большом числе циклов, следовало ожидать, что долговечность образцов при перегрузке должна увеличиться от тренировки образцов, когда число циклов предварительного нагружения сравнительно мало, чтобы затем уменьшиться за счет развившегося эффекта разупрочнения, когда число циклов велико.

На рисунке 8 представлены результаты исследования.

На горизонтальной оси графика показано число циклов предварительного испытания образцов ниже предела усталости ( $\sigma=22,2$  кг/мм<sup>2</sup>), на вертикальной — долговечность этих же образцов при напряжении выше предела усталости ( $\sigma=28,4$  кг/мм<sup>2</sup>).

Несмотря на большой разброс отдельных опытных результатов, видно, что полученная кривая имеет в левой своей части тенденцию к возрастанию, проходит через максимум при числе циклов предварительного испытания, примерно равном 4,0 млн., после чего понижается в неко-

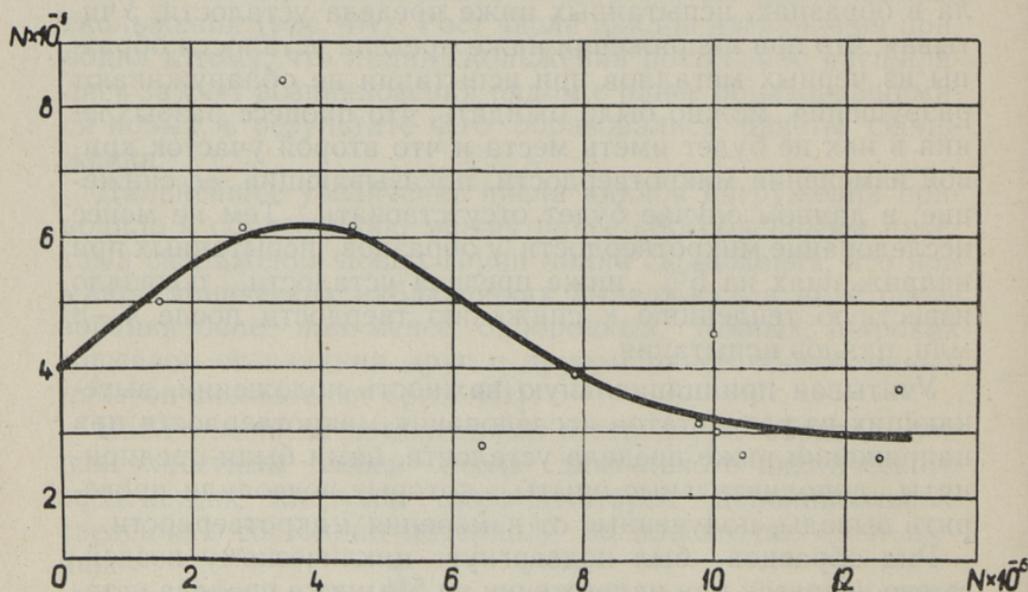


Рис. 8. Изменение долговечности образцов из стали 20 при напряжении  $\sigma=1,2\sigma_{-1}$  в зависимости от числа циклов предварительного нагружения при напряжении  $\sigma=0,95\sigma_{-1}$ .

торых случаях до значения, меньшего средней долговечности образцов, не прошедших предварительной «тренировки». Хотя число точек для получения вполне достоверного хода кривой недостаточно, тем не менее можно видеть, что эффект разупрочнения, обнаруженный при недогрузках методами испытания твердости, подтверждается.

Полученные результаты основываются на сравнительно малом количестве опытного материала и поэтому нуждаются в дальнейшей тщательной проверке.

Дальнейшие исследования в данном направлении должны также выяснить причины разупрочнения материала при циклическом нагружении, когда действующие напряжения меньше предела усталости, т. к. на основе настоящей работы сколько-нибудь достоверного объяснения обнаруженному явлению привести затруднительно.

## ВЫВОДЫ

1. Результаты настоящей работы подтверждают наличие двух процессов, одновременно протекающих в материале при усталости: на первой стадии циклического воздействия нагрузок имеет место процесс преимущественного упрочнения материала, сменяющегося превалирующим разупрочнением, когда число циклов нагружения достаточно велико.

2. При напряжениях  $\sigma = 0,95\sigma_{-1}$  после большого числа циклов нагружения также отмечено возникновение процесса разупрочнения, обуславливающего понижение долговечности при повторных испытаниях, когда  $\sigma = 1,2\sigma_{-1}$ .

3. Исследование изменения микротвердости в ферритных зернах при  $\sigma = 1,2\sigma_{-1}$  показало, что твердость в зернах с полосами сдвига в стадии упрочнения возрастает интенсивнее, чем в зернах, где полосы сдвига не обнаруживались. В стадии разупрочнения микротвердость в зернах с полосами сдвига падает интенсивнее, чем в остальной части ферритной структуры металла.

В принципе аналогично происходит изменение микротвердости в различных зернах феррита при напряжении  $\sigma = 0,95\sigma_{-1}$ , с той лишь разницей, что эффект снижения твердости в данном случае выражен слабее.

4. На основе проведенных исследований установлено, что полосы на ферритных зернах при усталости:

а) возникают на зернах с максимальной пластичностью;

б) появление полос сдвига и дальнейшее их развитие при увеличении числа циклов нагружения до определенного значения характеризуется наиболее интенсивным упрочнением материала.

При дальнейшем росте числа циклов нагружения, после достижения максимума упрочнения, в зернах с полосами сдвига происходят процессы, вызывающие интенсивное разупрочнение материала зерен;

в) по своей природе полосы на ферритных зернах при уставании не являются микротрещинами и наиболее правдоподобным кажется считать их пакетами скольжения.

5. Изменение вида отпечатков от измерения микротвердости может служить показателем изменения пластических свойств материала при уставании.

Наблюдениями за изменением вида отпечатков установлено, что процесс усталости сопровождается уменьшением пластичности материала.

6. При циклическом воздействии нагрузок при  $\sigma = 1,2\sigma_1$  имеют место значительные кратковременные нагревы в отдельных зернах феррита, вызывающие повышение температуры в этих зернах до 300—320°C.

При напряжении  $\sigma = 0,95\sigma_1$  подобный эффект устанавливался редко.

## Литература

1. Г. Дж. Гаф. Усталость металлов, 1935 г.
2. Н. Н. Афанасьев. Статистическая теория усталостной прочности металлов, 1953 г.
3. И. А. Одинг. Структурные признаки усталости металлов как средство установления причин аварии машин, 1949 г.
4. В. И. Беляев и Т. А. Лебедев. Машиностроение, Труды ЛПИ, № 4, 1953 г.
5. Б. А. Кузнецов. Ж. Т. Ф., XXVI, вып. 5, 1956 г.
6. Г. Я. Васильев. Зав. лаб., т. XIV, вып. 2, 1948 г.
7. Д. Б. Гогоберидзе и Н. А. Кобацкий. Сб. Микротвердость, Труды совещания по микротвердости, 1951 г.
8. Н. Ю. Икорникова. Сб. Микротвердость. Труды совещания по микротвердости, 1951 г.
9. В. К. Григорович. Зав. лаб., том. XVI, вып. 8, 1950 г.
10. Ч. Баррет. Структура металлов, 1948 г.
11. Ю. К. Мазинг. Диссертация, 1955 г.

Р. К. Мозберг  
ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ МИКРОСТРУКТУРЫ  
И СВОЙСТВ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПРИ  
ИСПЫТАНИИ НА УСТАЛОСТЬ

Издательство  
Таллинского Политехнического Института

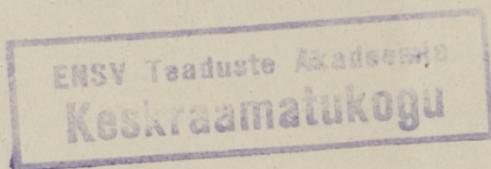
\*

Редактор П. Вольмер  
Технический редактор А. Тамм  
Корректор Н. Шервинская

Сдано в набор 9. II 1957. Подписано к печати 5 III 1957. Бумага  
54×84 1/16. Печатных листов 1,50. По формату 60×92 печатных  
листов 1,22. Учетно-издательских листов 1,00. Тираж 800. МВ-01658  
Заказ. № 831.

Типография «Коммунист», Таллин, ул. Пикк, 2.

Цена 70 коп.





70 коп.

EESTI AKADEEMILINE RAAMATUKOGU



1 0200 00133832 0