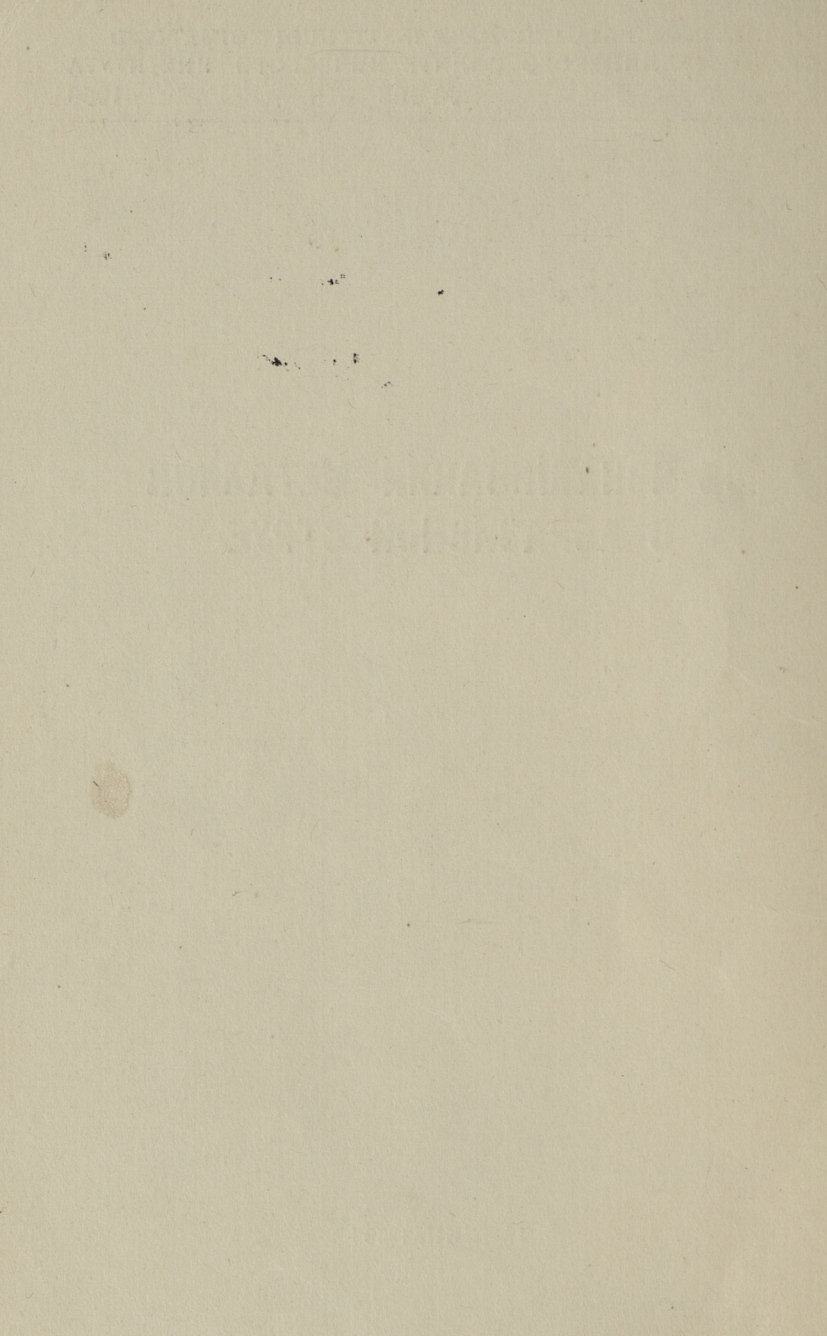


И. КЛЕЙС

**ОБ ИЗНАШИВАНИИ МЕТАЛЛОВ
В АБРАЗИВНОЙ СТРУЕ**



И. КЛЕЙС

**ОБ ИЗНАШИВАНИИ МЕТАЛЛОВ
В АБРАЗИВНОЙ СТРУЕ**

H. KLEIN

DE NORDENSKA METALLER
S. 1-100

Ep. 5461



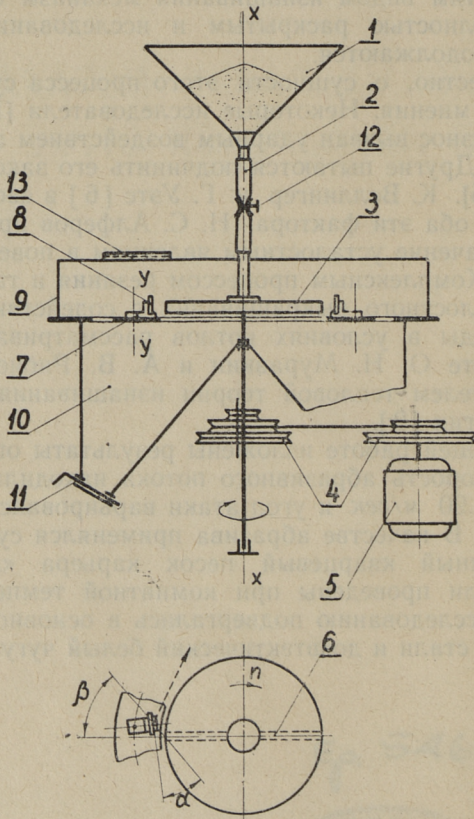
Изнашивание материалов в потоке абразивных частиц наблюдается у котлов, работающих на пылевидном топливе, дезинтеграторов для измельчения сыпучих материалов, пневмотранспортных установок, газовых турбин на твердом топливе и т. п. Несмотря на некоторые успехи в борьбе с этим видом изнашивания механизм его нельзя считать полностью раскрытым и исследования в этой области продолжаются.

Как известно, о сущности этого процесса существуют различные мнения. Некоторые исследователи [1, 2] полагают, что износ вызван ударным воздействием абразивного потока. Другие пытаются подчинить его законам резания [3, 4, 5]. К. Веллингер и Г. Уэрс [6] в своей работе учитывают оба эти фактора. Н. С. Алферов приписывает главное значение усталостным явлениям в поверхностном слое [7]. Комплексным процессом резания и так называемого усталостного выкрашивания с содействием агрессивной среды в условиях котлов рассматривают его в своей работе О. Н. Муравкин и А. В. Рябченков [8]. Представителем тепловой теории изнашивания является В. С. Селюгин [9].

В настоящей работе изложены результаты опытов, при которых скорость абразивного потока находилась в диапазоне 25...90 м/сек и угол атаки варьировался в пределах 8—90°. В качестве абразива применялся сухой фракционированный кварцевый песок карьера «Мянкику». Опыты были проведены при комнатной температуре на воздухе. Исследованию подвергались в основном различные марки стали и доэвтектический белый чугун.

1. ОПЫТНАЯ УСТАНОВКА

В качестве опытной установки применялась сконструированная автором центробежная машина. Схема машины дана на фиг. 1.



Фиг. 1. Схема опытной машины.

Принцип работы данной машины заключается в следующем. Определенное количество абразива засыпают в бункер 1, откуда через резиновый шланг 2 направляют его в центральное отверстие рабочего колеса 3. Последнее вращается вокруг оси $x-x$. Скорость вращения n можно изменять перестановкой шкивов 4. Диаметр рабочего колеса равен 400 мм. Силовым источником является электродвигатель 5 мощностью 0,6 квт.

Частицы абразива, попавшие в центр колеса, под действием центробежной силы проходят каналы 6 и выходят из них под углом β (β — угол выхода) со скоростью v_b . Каналы изготовлены из закаленной стали марки У7 и могут быть сменяемы. На основании фиг. 1 скорость выхода частиц выражается

$$v_b = \frac{v_\tau}{\sin\beta}, \quad (1)$$

где v_τ — линейная скорость обода колеса.

Из теоретических вычислений следует, что угол β зависит только от приведенного коэффициента трения между частицей и каналом. Поэтому в случае частиц абразива идентичной формы, имеющих одинаковое сопротивление скольжения по каналу, скорость их выхода была бы постоянной и независимой от массы. Как показывают скоростные киносъемки (см. следующий параграф), реальные частицы одинаковой скорости не имеют. Поэтому приходится оперировать с некоторой средней величиной, считая скорость струи равной этой средней величине. Максимальные отклонения скорости частиц от среднего значения могут при пользовании определенной функцией песка достигать 25%. Несмотря на эти отклонения после скоростей данной машины следует считать более однородным по сравнению с пневматическими опытными установками, где огромное значение при ускорении абразивных частиц имеют их масса и форма.

Вокруг рабочего колеса в специальных держателях 7 закреплены плоские образцы 8 размерами $21 \times 21 \times 4,5$ мм. Площадь на фронтальной поверхности образца, подвергающаяся изнашиванию, равняется 1 см². В целях изменения угла атаки между абразивной струей и поверхностью образца держатели можно закреплять в разных положениях вокруг осей у-у.

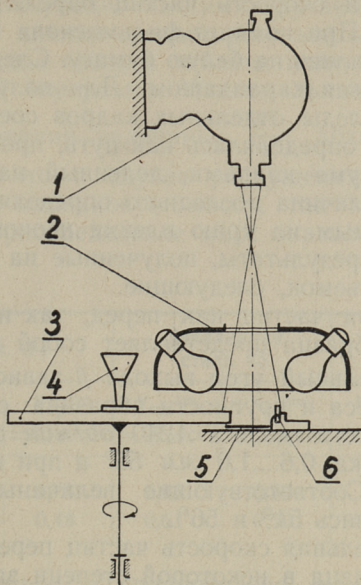
Отскакивающие от поверхности образца частицы после рикошетов о колесо 3 и кожух 9 под действием силы тяжести падают в сборный бункер 10. Удаление отработанного абразива производится периодически через шибер 11. Исползованный абразив вторично не применялся.

Для защиты боковых поверхностей образца от первичной струи и задней поверхности от рикошетных вторичных частиц в машине применялись специальные защитные чехлы, оставлявшие открытой только фронтальную поверхность образцов. Число и скорость отдельных случайных рикошетов о фронтальную поверхность столь незначительны, что изнашивающий эффект рикошетов по сравнению с первичной струей можно считать ничтожным. Зажим 12 служит для регулирования концентрации струи. Пределы регулирования — $0,02-1,30 \text{ г/см}^2\text{сек}$. Через застекленное окошко 13 можно вести визуальное наблюдение процесса.

Более подробное описание машины дано в ранее опубликованной статье автора [10], где также приведены уравнения для связывания геометрических и кинематических параметров машины с параметрами изнашивания. Следует еще отметить, что некоторые, сделанные в вышеназванной статье выводы в ходе последующих экспериментов уточнились, — особенно в части определения траектории и истинных скоростей абразивных частиц.

2. ПРОВЕДЕНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ СКОРОСТНЫХ КИНОСЪЕМОК

С целью выяснения поведения песчинок после их выхода из рабочего колеса, а также после удара о поверхность образца были проведены кинокамерой СКСМ скоростные киносъемки. Схема киносъемок дана на фиг. 2. На этой схеме цифрой 1 показана кинокамера и цифрой 3 рабочее колесо опытной машины. Машина во время съемок работала без крышки. Для освещения песчинок применялся специальный рефлектор 2. Съёмки проводились на фоне черного бархата 5. Песчинки вводились в центральное отверстие колеса через воронку 4. После выхода из колеса они проходили определенное расстояние, после чего ударялись о фронтальную поверхность образца 6. Для съемок применялась 16-миллиметровая нега-



Фиг. 2. Схема проведения скоростных киносъемок.

тивная пленка. Скорость съемок находилась в пределах от 2500 до 3500 кадров в секунду. Съемки были проведены при разных скоростях колеса и с разными фракциями песка. На фиг. 3 показана короткая серия полученных кадров.



Фиг. 3. Серия из 5 кадров скоростных киносъемок. На правом краю кадра видна часть рабочего колеса. Направление вращения колеса — по часовой стрелке. Внизу на левом углу кадра находится образец. Белые штрихи на черном фоне обозначают следы движущихся, — белые точки — находящиеся на бархате частиц песка.

Траектория и скорость частиц определялись следующим образом. При помощи фильмоскопа отдельные кадры проектировались на белую бумагу. След каждой частицы фиксировался карандашом. Для получения траектории частицы следы отдельных кадров соединялись. Скорость частицы определялась как путь, пройденный частицей между двумя кадрами, деленный на соответствующее время. Величина последнего определялась по отметкам, оставляемым на краю пленки неоновой лампочкой.

Важнейшие результаты, полученные на основании скоростных киносъемок, следующие.

1. Траектория частиц как перед, так и после удара о поверхность образца представляет собой прямую линию.

2. Действительный угол выхода β зависит от скорости вращения колеса и крупности абразива: средняя величина при скорости колеса 1240 об/мин составляла при крупности песка 0,6...1,0 мм 55° и при крупности 0,3...0,4 мм 60° . Соответствующие величины β при 3285 об/мин равнялись 51° и 56° .

3. Действительная скорость частиц перед ударом о поверхность образца в некоторой степени зависит от крупности абразива. С уменьшением массы частиц в 12 раз средняя скорость струи снизилась в среднем на 8%.

4. Угол отражения (то-есть угол между траекторией частицы после удара и поверхностью образца) не связан с углом атаки. Он может быть как больше, так и меньше последнего. Это обстоятельство явно вызвано незакономерной формой частиц.

5. Многие песчинки после удара о поверхность образца, особенно при больших скоростях, разрушаются. Наблюдалось до пяти осколков одной песчинки, причем каждый из них имел разную скорость и разное направление движения. Также выяснилось, что некоторые отдельные осколки даже имеют большую скорость, чем сама частица перед ударом.

На основании проведенных измерений можно получить некоторое представление о скорости частиц, сохраняющейся после их удара. Величиной, характеризующей сохраняющееся количество движения частицы, принято соотношение $\frac{v'}{v}$, где v — скорость частицы перед ударом и v' — скорость после удара. Как показывают опыты, эта величина имеет сравнительно большой разброс дан-

ных, вызванный очевидно многими случайными факторами. В таблице 1 даются средние результаты проведенных измерений. Каждое число в таблице получено в среднем на основании 50 измерений. Максимальные отклонения от средних значений величины $\frac{v'}{v}$ доходят до 50%. Было принято, что в случае разрушения частицы все осколки имеют одинаковую массу, так как установить действительное распределение масс оказалось невозможным.

Т а б л и ц а 1

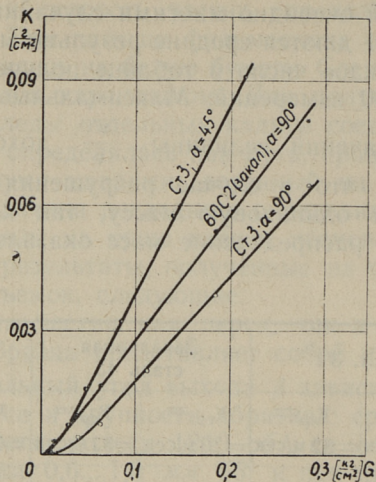
$\alpha_{\text{ср}}$		Ст. 3		Закаленная сталь 45		Белый чугун	
		$v_{\text{ср}} =$	$v_{\text{ср}} =$	$v_{\text{ср}} =$	$v_{\text{ср}} =$	$v_{\text{ср}} =$	$v_{\text{ср}} =$
		=29 м/сек	=82 м/сек	=29 м/сек	=82 м/сек	=29 м/сек	=82 м/сек
$\frac{v'}{v}$	40°	0,82	0,78	0,85	0,80	0,83	0,74
	70°	0,63	0,48	0,61	0,50	0,67	0,57

Большой разброс и сравнительно малое количество опытных данных не позволяют на основании приведенных величин сделать определенных выводов. Однако ясно, что после удара абразивная частица сохраняет значительную долю своей начальной скорости и кинетической энергии. Можно также заметить тенденцию уменьшения соотношения $\frac{v'}{v}$ с увеличением угла атаки и начальной скорости частицы.

3. УТОЧНЕНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

Одной из целей исследования являлось уточнение количественных зависимостей между интенсивностью и основными параметрами изнашивания. Этими параметрами изнашивания являются скорость v и угол атаки α абразивного потока.

При разработке методики исследования были сняты кривые изнашивания различных материалов, т. е. найдена связь между количеством абразива на 1 см² поверхности и износом. Некоторые из них показаны на фиг. 4. Из этих опытов выяснилось, что в начальной фазе процесса мате-

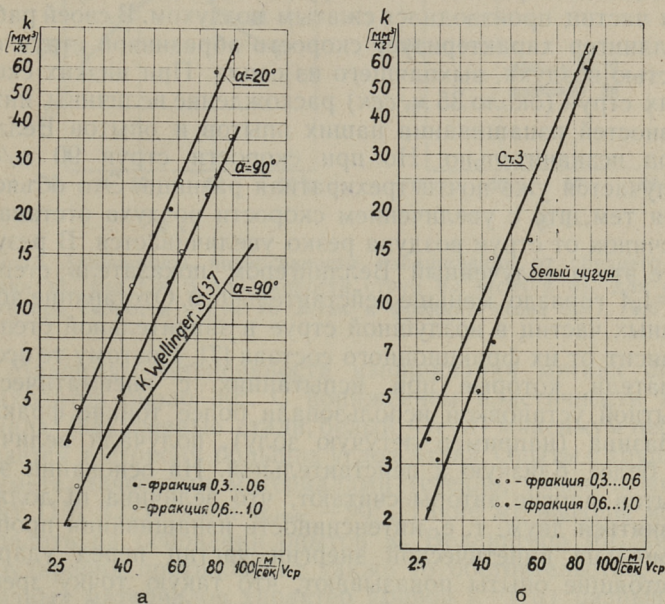


Фиг. 4. Зависимость износа от количества песка на квадратный сантиметр поверхности. Скорость песка — 82 м/сек, фракция песка — 0,6...1,0 мм.

риалы изнашиваются с переменной интенсивностью. Поэтому эту фазу можно характеризовать как неустановившийся режим изнашивания. В дальнейшем процесс стабилизируется и кривая переходит в прямую. Этой второй фазе соответствует т. наз. установившийся режим изнашивания. Как показывают опыты, длительность первой фазы изнашивания кроме материала образца зависит также от скорости и угла атаки абразивной струи; с увеличением скорости и уменьшением угла атаки она, как правило, укорачивается. Под интенсивностью изнашивания k в настоящей работе понимается потеря веса (или уменьшение объема) образца, соответствующая одному килограмму израсходованного при этом абразива при установившемся режиме изнашивания. Ее численная величина равняется тангенсу угла наклона прямого участка кривой изнашивания.

Для уточнения зависимости интенсивности изнашивания от скорости струи были проведены опыты с двумя фракциями песка при углах атаки 20° , 45° и 90° . Испытывались материалы Ст. 3, доэвтектический белый чугун и закаленная сталь 45. Некоторые результаты этих испы-

таний приведены на фиг. 5 в логарифмических координатах. Каждая точка, изображенная на графике, представляет собой средний результат испытаний 3—10 образцов. Максимальные отклонения от среднего значения при этом не превышали $\pm 16\%$. Скорость струи v представляет собой среднюю арифметическую величину скоростей отдельных частиц (определенных на основании киносъемок).



Фиг. 5. Зависимость интенсивности изнашивания от средней скорости, а) для Ст. 3 при разных углах атаки, б) для разных материалов при угле атаки 45° .

Анализ кривых позволяет заключить, что зависимость между интенсивностью изнашивания k и скоростью абразивной струи v достаточно точно описывается уравнением

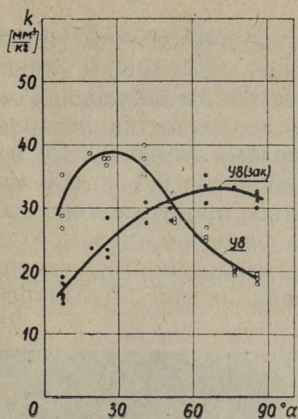
$$k = av^m. \quad (2)$$

В уравнении (2) коэффициент a зависит от свойств материала образца и угла атаки. Его численная величина равняется интенсивности изнашивания при $v=1$ м/сек. Показатель степени m зависит только от свойств материала. На основании проведенных опытов его величину при всех углах атаки с достаточной точностью можно при-

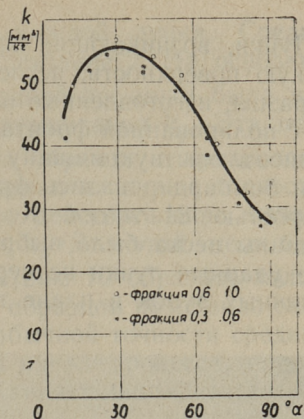
нять для Ст. 3 — 2,3, для закаленной стали 45 — 2,5 и для белого чугуна — 2,8.

Кроме данных настоящей работы на фиг. 5а изображен график, полученный К. Веллингером [6] при испытании стали марки St 37, механические свойства которой близки свойствам Ст. 3. В качестве абразива Веллингер применял кварцевый песок крупностью 0,2 . . . 1,5 мм. Разгон частиц производился сжатым воздухом. В своей работе Веллингер характеризует скорость абразивной струи скоростью воздуха, выходящего из сопла. При низких скоростях струи (около 35 м/сек) расхождение величины интенсивностей изнашивания наших опытов и опытов Веллингера незначительно. Но при скорости струи 90 м/сек. получается уже почти трехкратная разница. Это объясняется тем, что с увеличением скорости воздуха отставание песчинок от струи воздуха резко увеличивается. В результате этого полученный Веллингером показатель степени $m=1,4$ гораздо меньше действительного. Отставание абразивных частиц в воздушной струе в значительной степени зависит от их фракционного состава [7]. Поэтому те исследователи, которые при испытаниях с пневматической опытной установкой использовали более тонкие фракции абразива (например летучую золу), получали величину m более близкую к действительной. На основании этих опытов многие авторы считают, что величина m должна равняться двум, т. е. интенсивность изнашивания пропорциональна кинетической энергии частиц перед ударом. Настоящие опыты показывают, что такую точку зрения следует считать неточной.

Кроме влияния скорости была проверена роль угла атаки в процессе изнашивания. Опыты на центробежной машине с разными материалами подтвердили высказывания большинства авторов о влиянии угла атаки на интенсивность изнашивания. Учитывая, что при данной конструкции испытательной машины удары по ширине образца совершаются последовательно и отскакивающие частицы не соударяются с первичными, то это влияние не может быть объяснено т. наз. теорией соударений В. С. Селюгина [9]. Следовательно угол атаки наряду со скоростью струи надо считать основным параметром, определяющим интенсивность изнашивания данного материала. Зависимость интенсивности изнашивания от среднего угла атаки графически изображена на фиг. 6.



а б



в а

Фиг. 6. Зависимость интенсивности изнашивания от среднего угла атаки а). для Ст. 3 при скорости струи 82 м/сек и б). для стали У8 при скорости струи 76 м/сек и фракции песка 0,3...0,6 мм.

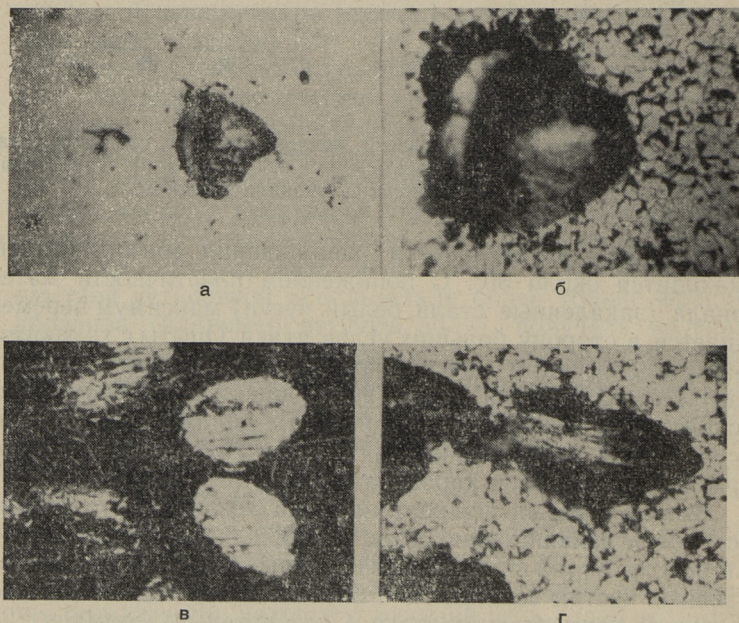
Максимум интенсивности изнашивания мягких сталей находится около 30° . С понижением пластичности материала (закаленные стали, белый чугун) максимум перемещается в сторону больших углов атаки. Опыты с хрупкими неметаллическими материалами (стекло, эмаль и микролит ЦМ 322) дали $\alpha_{\text{макс}} = 90^\circ$. Такие же выводы можно сделать на основании опытов К. Веллингера [6]. Теории соударения противоречит также то обстоятельство, что у разных материалов характер кривой $k=f(\alpha)$ разный.

Опыты с двумя фракциями песка показали, что интенсивность изнашивания стали Ст. 3, закаленной стали 45 и белого чугуна практически не зависит от величины абразивных частиц (см. фиг. 5 и ба). Также не было замечено влияния концентрации струи. Следовательно формулу (2) можно рассматривать универсальным уравнением изнашивания металлов в струе песка, связывающим интенсивность изнашивания данного материала с основными параметрами струи (v и α).

4. ИЗУЧЕНИЕ КАЧЕСТВЕННОЙ СТОРОНЫ ПРОЦЕССА

Для изучения явлений, протекающих в металле во время ударного износа, в данной работе применялись микроскопические и рентгенографические методы исследования.

Лунки, возникающие при ударе песчинок о металлическую поверхность, исследовались следующим образом. Образцы, изготовленные из стали Ст. 3 и закаленной стали У8 с полированной фронтальной поверхностью устанавливались в опытную машину под углами атаки 20° , 45° и 90° . Они бомбардировались фракцией песка $0,3 \dots 0,4$ мм со скоростью 81 м/сек. Количество пропускаемого через машины песка было выбрано с расчетом, чтобы отдельные ударные лунки не перекрывались. Форма некоторых типичных лунок в плане показана на фиг. 7. Микроско-

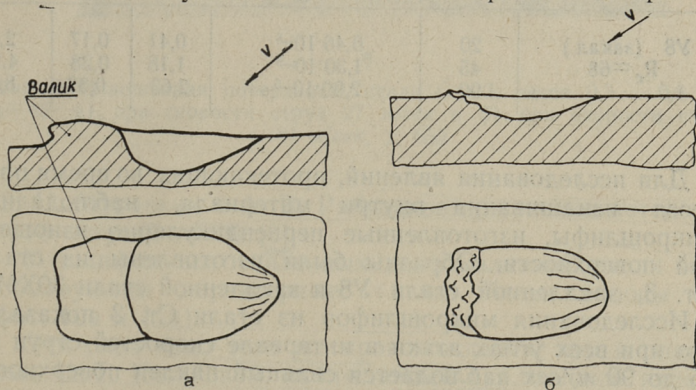


Фиг. 7. Типичные ударные лунки песчинок на поверхности металла. Скорость струи 81 м/сек, направление проекции скорости — справа налево. Песок — $0,3 \dots 0,4$ мм. а). закаленная сталь 60С2А, $\alpha=45^\circ$, $\times 200$ б). Ст. 3, $\alpha=45^\circ$, $\times 200$ в). закаленная сталь 60С2А, $\alpha=20^\circ$, $\times 300$. г). Ст. 3, $\alpha=20^\circ$, $\times 300$. Фиг. а и б имеют характерный валик, фиг. в и г валика не имеют.

пом микротвердомера ПМТ-3 измерялись длина, ширина и глубина ста лунок каждого образца. С предпосылкой, что форма лунок соответствует полуэллипсоиду, вычис-

лялся приблизительный объем каждой лунки. Средняя величина объемов $V_{\text{ср}}$ дается в таблице 2. На основании этих объемов и среднего веса одной песчинки была найдена условная интенсивность изнашивания k_y . Эта величина соответствует потере веса образца с предположением, что при ударе весь материал из лунки полностью удаляется. Определялась также действительная начальная интенсивность изнашивания k_n . Для этой цели были одновременно взвешены и испытаны 10 образцов толщиной 2 мм. Большое количество образцов позволило заметить на аналитических весах обычной точности среднюю потерю в весе образцов в самом начале процесса, т. к. потеря в весе одного образца составляет лишь десятки миллиграммов. Соотношение $\frac{k_y}{k_n}$, данное в таблице 2, характеризует пластические деформации в поверхностном слое образца.

Наблюдения ударных лунок в случае $\alpha \neq 90^\circ$ показывают, что при ударе песчинки о металлическую поверхность возникающая пластическая деформация имеет направленный характер: материал из лунки вытесняется в сторону проекции вектора скорости частицы. Профили возникающих лунок схематически изображены на фиг. 8.



Фиг. 8. Схемы типичных ударных лунок на поверхности металла а) лунка с характерным валиком и б) лунка без валика.

На дне многих лунок наблюдаются характерные для процесса резания риски и блеск. Поэтому данную деформацию можно классифицировать как резание металла. Одна-

ко это резание часто не сопровождается отделением стружки, а происходит только перемещение материала на край лунки и образование характерного валика (см. фиг. 7 и б). Например, при $\alpha = 20^\circ$ сто измеренных лунок на образце стали Ст. 3 валик имели 82 и на образце закаленной стали У8 валик отмечался у 37 лунок. Эти данные хорошо согласуются с данными таблицы 2, из чего видно, что при мягком материале, по сравнению с менее пластичными материалами, отделяется меньшая часть объема лунок. При углах атаки, близких 90° , металл вытесняется из лунки в сторону наименьшего сопротивления. Поэтому направление пластической деформации в этом случае в основном зависит от формы песчинок.

Т а б л и ц а 2

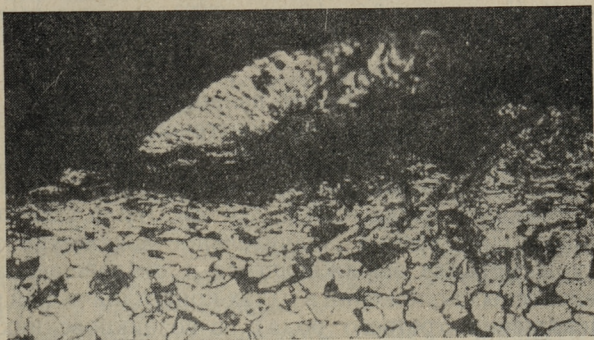
Материал	α°	$V_{\text{ср}}$ мм ³	k_y г/кг	k_H г/кг	$\frac{k_y}{k_H}$
Ст. 3 $R_B = 74$	20	$2,05 \cdot 10^{-5}$	1,85	0,22	8,4
	45	$5,75 \cdot 10^{-5}$	5,38	0,18	30,0
	90	$6,75 \cdot 10^{-5}$	6,10	0,08	76,3
У8 (закал.) $R_c = 68$	20	$0,46 \cdot 10^{-5}$	0,41	0,17	2,4
	45	$1,30 \cdot 10^{-5}$	1,18	0,28	4,2
	90	$2,90 \cdot 10^{-5}$	2,63	0,32	8,2

Для исследования явлений, протекающих во время процесса изнашивания внутри материала, наблюдались микрошлифы, изготовленные перпендикулярно изношенной поверхности. Образцы были изготовлены из стали Ст. 3, закаленной стали У8 и закаленной стали 30ХМА

Исследования микрошлифов из стали Ст. 3 показали, что при всех углах атаки в интервале скоростей струи от 25 до 90 м/сек наблюдается сильный наклеп поверхностного слоя образца. После наступления установившегося режима процесса изнашивания можно в отдельных местах заметить развивающиеся параллельно поверхности трещины, по которым происходит отделение уже перенаклепанного слоя металла (см. фиг. 9). Отметим здесь же, что аналогичное, т. наз. отслаивание наблюдали также



а



б

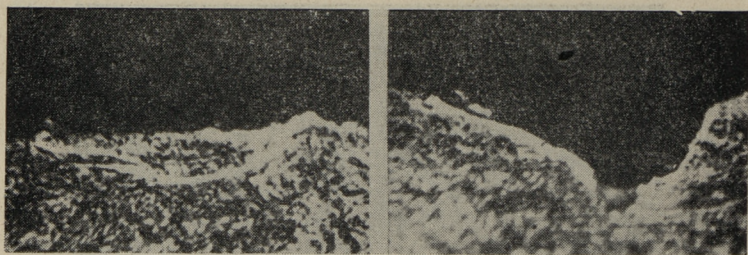
Фиг. 9. Изношенная поверхность стали Ст. 3, песок 0,3...0,6 мм, $\alpha=45^\circ$ а). при скорости струи 27 м/сек и б). при скорости струи 81 м/сек, $\times 650$

О. Н. Муравкин и А. В. Рябченков при износе котельных труб летучей золой [8].

У шлифов, изготовленных из закаленной стали были обнаружены характерные, т. наз. белые полосы (см. фиг. 10а и 11а).

Эти слои явно того же происхождения, что и описанные Е. Т. Котиковой, наблюдавшей аналогичное явление при дробеструйном наклепе отпущенной стали 40Х в стадии перенаклепа [11]. Они служат очагами развивающихся под действием последующих ударов трещин. Фиг. 10б показывает, что отделение частиц материала происходит именно по этим белым полосам.

Для уточнения изменений, происходящих в кристалли-



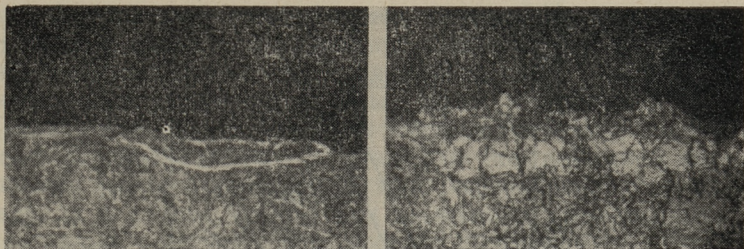
а

б

Фиг. 10. Изношенная поверхность закаленной стали У8. Скорость струи — 81 м/сек, песок 0,6...1,0 мм, $\alpha=90^\circ$. а), перед отделением частицы материала, б), после отделения частицы. $\times 1000$

ческой решетке при ударном изнашивании, было проведено совместно с Р. Мозберг рентгенографическое исследование процессов, протекающих в отпущенной стали Ст. 3. В этих опытах скоростью струи было принято 81 м/сек, фракцией песка — 0,3...0,6 мм. Было установлено, что происходит весьма значительное искажение тонкой структуры металла, выражающееся в отклонениях атомов из равновесных положений в узлах кристаллической решетки (искажения третьего рода), в возникновении упругих искажений кристаллографических плоскостей (искажения второго рода) и в измельчении блочной структуры металла. Эти изменения выражались тем сильнее, чем больше был угол атаки. Выявление толщины наклепанного слоя проводилось рентгенографированием с последующим удалением электрополировкой поверхностных слоев образца определенной толщины до тех пор, пока рентгенограмма оказывалась тождественной рентгенограмме исходного материала. При угле атаки 90° такое полное восстановление ширины линий рентгенограмм происходило после удаления поверхностного слоя толщиной 0,25...0,30 мм, причем наибольшие искажения были в поверхностном слое толщиной около 0,1 мм. При угле атаки 20° толщина наклепанного слоя была несколько меньше — порядка 0,15...0,2 мм.

Проведенные измерения микротвердости поверхностных слоев образцов показали, что закаленные стали при изнашивании воспринимают также некоторый наклеп. На фиг. 116 виден рост зерна закаленной стали 30ХМА



а

б

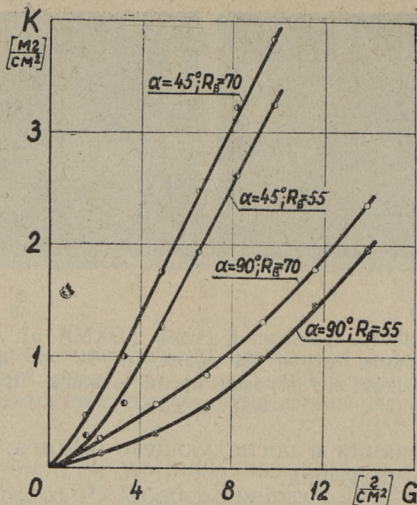
Фиг. 11. Поверхность закаленной стали 30ХМА а). после изнашивания при скорости струи 81 м/сек, $\alpha=90^\circ$ и фракции песка 0,3..0,6 мм, б). тот же образец после отжига при температуре 660°. $\times 300$

после изнашивания и последующего отжига, подтверждающий наличие наклепа.

На основании предыдущего можно заключить, что изнашивание металлов в абразивной струе сопровождается теми же явлениями, что и процесс дробеструйного наклепа. Этот вывод подтверждается также опытами К. Веллингера [6], получившего при изнашивании металлов посредством дроби подобные же закономерности, как и с другими видами абразивов.

Так как абразивные частицы в начале процесса затрачивают значительную долю своей кинетической энергии на пластическое деформирование верхнего слоя образца (т. е. наклепу), то следует ожидать, что образцы, которые уже перед изнашиванием имеют поверхностный наклеп, в начале процесса изнашиваются, по сравнению с отожженным, более интенсивно. Это предположение проверялось следующим экспериментом. Тонкие образцы из малоуглеродистой стали подвергались отжигу. Поверхности половины образцов упрочнялись ударами молотка. В результате их начальная твердость $R_B = 55$ повышалась до $R_B = 70$. Одновременным испытанием десяти отожженных и десяти наклепанных образцов были найдены кривые изнашивания (см. фиг. 12), из которых видно, что в начале процесса наклепанные образцы действительно изнашиваются интенсивнее. Позднее интенсивность изнашивания выравнивается.

Аналогичная картина наблюдалась также при скорости струи 27 м/сек.



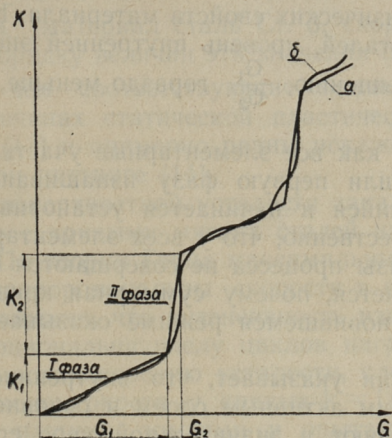
Фиг. 12. Сравнение кривых изнашивания отожженной и наклепанной малоуглеродистой стали. Фракция песка 0,3...0,6 мм, скорость струи 81 м/сек.

5. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

На настоящем этапе исследований механизм изнашивания можно представить следующим образом.

Рассмотрим процесс изнашивания в пределах одного элементарного участка, размеры которого несколько меньше линейных размеров абразивной частицы. При получении первого удара происходит пластическая деформация, которая может сопровождаться отделением микроскопической частицы металла. В результате пластической деформации происходит искажение кристаллической решетки, металл в некотором объеме упрочняется, повышается его внутренняя энергия. С получением каждого следующего удара эти процессы усугубляются: повышается степень наклепа и уровень внутренней энергии приближается к насыщению. Постепенно теряя свои пластические свойства, верхний слой образца начинает трескаться. Поверхность становится шероховатой, причем хрупкие гребни неровностей легко скалываются под ударами абразивных частиц. Описанные явления соответствуют первой фазе процесса, изображенного на фиг. 13. В конце

этой фазы возникает перенаклеп, который в зависимости от свойств материала выражается либо в виде отслаивания перенаклепанной части материала, либо в виде возникновения характерных белых полос и трещин в них. Когда возникающие трещины охватывают значительную часть рассматриваемого участка, уже под действием единичного удара отделяется частица перенаклепанного материала в объеме одного или нескольких смежных элементарных участков. Этот процесс соответствует второй фазе фиг. 13.



Фиг. 13. Схематическое изображение зависимости между износом K и количеством абразива G в пределах одного элементарного участка поверхности металла.

Оставшаяся под отделившейся частью материала «свежая» поверхность испытывает описанный цикл заново.

На фиг. 13 изображены две кривые. Из них кривая «а» описывает процесс идеализированно с предположением, что все частицы, имеющие одинаковую величину, отделяют равное количество материала. Действительный ход процесса можно представить соответственно кривой «б», так как изнашивающий эффект отдельных ударов зависит от многих случайных факторов (например от ориентации частиц, имеющих незакономерную форму в момент соприкосновения с поверхностью, от действительной площади контакта и т. д.).

Обозначим износ в первой фазе K_1 и соответствующее количество абразива G_1 ; те же величины второй фазы соответственно — K_2 и G_2 . Как их абсолютная величина, так и соотношения $\frac{K_1}{K_2}$ и $\frac{G_1}{G_2}$ зависят от основных параметров изнашивания и физических свойств материала. При малых величинах α , когда условия резания более благоприятны, соотношение $\frac{K_1}{K_2}$ по сравнению с крутыми углами атаки больше. Соотношение $\frac{G_1}{G_2}$ в основном зависит от физических свойств материала. Напр. в случае закаленных сталей, уровень внутренней энергии которых близок к насыщению, $\frac{G_1}{G_2}$ гораздо меньше, чем у мягких сталей.

После того как все элементарные участки поверхности образца прошли первую фазу изнашивания, кончается неустановившийся и начинается установившийся режим процесса. Естественно, что у всех элементарных участков описанные фазы процесса не совершаются одновременно. Этим объясняется, почему суммарная кривая изнашивания при установившемся режиме оказывается практически прямой.

Б. Д. Грозин указывает, что внутренние напряжения между внешним активным слоем и основной массой металла определяют в значительной мере его износостойкость [12]. Величина и знак этих внутренних напряжений зависит от сочетания, последовательности и режимов процессов термической и холодной обработки металлов. Можно полагать, что и в данном случае внутренние напряжения в содействии с внешними силами ускоряют износ. Это обстоятельство может быть одной из причин, почему закаленные стали иногда имеют в начале процесса такую же или даже большую интенсивность изнашивания, как в конце. При испытании образцов, отлитых из белого чугуна и механически не обрабатывающихся, в начале процесса наблюдалась гораздо большая интенсивность изнашивания, чем при установившемся режиме. После удаления шлифованием литейной корки такой аномалии не замечалось.

Ряд обстоятельств указывает на сходство процессов во второй фазе изнашивания и при поверхностной усталости (питтинг). Назовем из них главные.

1. В обоих случаях поверхность металлов испытывает пульсирующие напряжения.

2. У некоторых материалов при износе возникают характерные белые полосы. Можно полагать, что их характер аналогичен той белой фазе, которая наблюдается в поверхностных слоях металла в случае питтинга.

3. Максимальные среднеквадратические смещения атомов из положения равновесия $\sqrt{\bar{u}^2}$, рассчитанные по уравнению Я. С. Уманского, имеют в настоящем случае значения при угле атаки 90° — $0,31 \text{ \AA}$ и при угле атаки 20° — $0,27 \text{ \AA}$ (материал сталь Ст. 3, скорость струи 81 м/сек). По порядку величин эти значения примерно в два раза выше, чем соответствующие значения $\sqrt{\bar{u}^2}$ при больших величинах статической пластической деформации металла [13] и примерно равны искажениям, наблюдающимся при питтинге [14].

4. Кривые поверхностной усталости закаленных сталей по сравнению с кривыми мягких сталей имеют больший наклон [15]. По теории Герца максимальные напряжения при ударе пропорциональны скорости в степени $2/5$ [6]. При предположении, что интенсивность изнашивания обратно пропорциональна числу циклов нагружения, соответствующих возникновению усталости, следует ожидать такие же закономерности у кривых $k = f(v)$, что и подтверждается нашими опытами и опытами К. Веллингера [6].

Наконец остановимся на вопросе распределения энергии при ударе. Для этой цели разберем баланс энергии абразивной струи. Вся кинетическая энергия, которой обладает определенное количество абразивных частиц в первичной струе, разлагается в процессе изнашивания на следующие компоненты.

1. Кинетическая энергия абразивных частиц и их осколков, сохраняющаяся после удара.
2. Увеличение поверхностной энергии абразивных частиц за счет их разрушения.
3. Увеличение теплосодержания абразивных частиц.
4. Увеличение поверхностной энергии металла за счет отделения продуктов износа.
5. Увеличение внутренней энергии основного металла.
6. Увеличение теплосодержания основного металла.

7. Увеличение внутренней энергии отделяющихся частиц металла.
8. Увеличение теплосодержания отделяющихся частиц металла.

Как уже отмечалось выше, некоторые авторы считают, что интенсивность изнашивания пропорциональна квадрату скорости абразивной струи. В таком случае при любой скорости струи баланс энергии не должен изменяться. В действительности показатель степени n не оказался равным двум. Поэтому с изменением скорости струи баланс энергии очевидно изменяется. Кроме скорости струи баланс энергии зависит от угла атаки и свойств материала образцов. Последний вывод сделан на основании опытов по определению прироста удельной поверхности песка (характеризующего второй компонент баланса энергии) при ударе об образцы, изготовленные из разных материалов. Определение удельной поверхности производилось посредством ситового анализа (фракции свыше 0,1 мм) и прибора ПСХ-2 (фракции меньше 0,1 мм). Начальная удельная поверхность песка $E = 96 \text{ см}^2/\text{г}$. При скорости струи 81 м/сек и угле атаки 45° приросты удельной поверхности ΔE составляли: образцы из стали Ст. 3 — $\Delta E = 89 \text{ см}^2/\text{г}$; образцы из белого чугуна — $\Delta E = 116 \text{ см}^2/\text{г}$; образцы из твердого сплава ВК8 — $\Delta E = 143 \text{ см}^2/\text{г}$. Эти данные показывают, что чем выше твердость образцов, тем большая доля кинетической энергии абразивной частицы затрачивается на его разрушение. При угле атаки 90° приросты удельной поверхности были в среднем на 15% выше. Влияние угла атаки, скорости частиц и свойств материала образцов на баланс энергии подтвердили также скоростные киносъемки (см. табл. 1).

Что касается баланса энергии единичной абразивной частицы, то он очевидно зависит также от фазы изнашивания и от многих случайных факторов. Последнее показывают также проведенные скоростные киносъемки. Поэтому рассматривание баланса энергии всего лишь одной частицы не дает характерных, сравнимых между собой данных.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты настоящей работы и ранее выполненных исследований позволяют заключить, что изнашивание металлов в абразивной струе является сложным, комплексным процессом. В нейтральной среде и при комнатной температуре в этот комплекс могут входить: 1. разрушение поверхности в результате высоких контактных напряжений; 2. резание микростружек абразивной частицей; 3. контактная усталость; 4. выплавление металла в результате высокой локальной температуры. Относительная роль каждого из перечисленных явлений в конкретном случае определяется: а). физико-механическими свойствами материала и абразива; б). скоростью и углом атаки абразивной струи; в). фазой процесса. В некоторых случаях одному из явлений можно приписать основную роль, ибо остальные отсутствуют или их влияние ничтожно.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Н. Сыркин. Золовой износ экономайзерных пучков. «Советское котлотурбостроение», № 3, 1945.
2. И. В. Кузнецов. Золовой износ труб и предельно допустимые скорости газа в котельных агрегатах. «Теплоэнергетика», № 4, 1955.
3. Н. Г. Залогин. Борьба с абразивным износом оборудования электростанций. «Электрические станции», № 2, 1950.
4. И. К. Лебедев. Золовой износ в котельных установках и борьба с ним. «Электрические станции», № 11, 1958.
5. В. Н. Братчиков. К вопросу о золотом износе трубчатых поверхностей нагрева котлоагрегатов. «Изв. вузов — Энергетика», № 5, 1958.
6. K. Wellinger, H. Uetz. Gleitverschleiss, Spülverschleiss, Strahlverschleiss unter der Wirkung von körnige Stoffen. VDI — Forschungsheft, Ausg. B, 21 (449) 1955.
7. Н. С. Алферов. Ударная эрозия рабочих лопаток газовой турбины на твердом топливе. Диссертация, Ленинград, 1952.
8. О. Н. Муравкин, А. В. Рябченков. Исследование коррозионно-абразивного изнашивания стали применительно к трубам водяных экономайзеров. Трение и износ в машинах, Сборник XI, АН СССР, Москва, 1956.
9. В. С. Селюгин. Методика и некоторые результаты исследования механизма износа металла запыленным потоком газа. Автореферат диссертации, Москва, 1956.
10. И. Клейс. Машина для исследования изнашивания свободным абразивом. Труды Таллинского политехнического института № 152, 1958.
11. Е. Т. Котикова. Влияние белых и черных полос в микроструктуре наклепанного дробью слоя на усталостную прочность стали. Повышение усталостной прочности стальных и чугунных деталей поверхностным наклепом, ЦНИИТМАШ, книга 74, 1955.
12. Б. Д. Грозин. Структура и деформация внешних слоев металла, работающих в условиях трения. Повышение износостойкости и срока службы машин, МАШГИЗ, 1956.
13. Г. С. Жданов, Я. С. Уманский. Рентгенография металлов, часть II, ГОНТИ ИКТП СССР, 1938.
14. В. Д. Сергеева, Ю. С. Терминасов. Рентгенографическое исследование поверхностных слоев при трении качения в зависимости от продолжительности обкатки. «Изв. вузов — Физика», № 5, 1958.
15. Г. К. Трубин. Контактная усталость зубьев прямозубых шестерен. МАШГИЗ, 1950.

И. Клейс
ОБ ИЗНАШИВАНИИ МЕТАЛЛОВ В АБРАЗИВНОЙ СТРУЕ
Таллинский Политехнический Институт

*

Редактор **Н. Щеглов**
Технический редактор **А. Тамм**
Корректор **Н. Шервинская**

Сдано в набор 10 IX 1959. Подписано к печати 02 X 1959.
Бумага 54×84¹/₁₆. Печатных листов 1,75. По формату 60×92
печатных листов 1,43. Учетно-издательских листов 1,24. Тираж 600.
МВ-07900. Заказ № 5816.

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

Цена 90 коп.

ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
5	12-я сн.	после	поле
5	13-я сн.	функцией	фракцией
13	1-я св. (части фиг. 6)	а б	б а
16	4-я св.	фиг. 7 и б	фиг. 7а и б

ОБ ИЗНАШИВАНИИ МЕТАЛЛОВ В АБРАЗИВНОЙ СТРУЕ

8-10-67
5-02-08

С 1. | 1961. г.

Цена — р. 9

Цена 90 коп.