

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED  
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА  
Серия А № 192 1962

---

**СБОРНИК СТАТЕЙ  
ПО ИЗНАШИВАНИЮ  
И ЗАЕДАНИЮ МАТЕРИАЛОВ**

ТАЛЛИН 1962





Ep. 6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED  
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА  
Серия А № 192 1962

---

СБОРНИК СТАТЕЙ  
ПО ИЗНАШИВАНИЮ  
И ЗАЕДАНИЮ МАТЕРИАЛОВ

ТАЛЛИН, 1962

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Х. Лепиксон, И. Клейс. Об изнашивании эмалевых покрытий в струе абразива . . . . . 3
2. Р. Мозберг, И. Клейс. Рентгенографическое исследование процессов, протекающих в металле при изнашивании в струе абразива . . . . . 20
3. Х. Кулдма. О критериях относительной износостойкости и о влиянии абсолютных размеров при испытаниях цилиндрических образцов на абразивное изнашивание . . . . . 29
4. Б. Саар. Установка по определению износостойкости материалов в абразивной сыпучей массе и методика исследования . . 35
5. У. Суур. Установка по исследованию износа металлов в струе абразива при повышенных температурах . . . . . 51
6. Э. Рийвес. Экспериментальная установка и методика исследования режимов заедания . . . . . 68

Er-4330





## **ОБ ИЗНАШИВАНИИ ЭМАЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ В СТРУЕ АБРАЗИВА**

### **1. Введение**

В связи с применением местных топлив с высоким содержанием золы (бурые угли и горючие сланцы) возросла актуальность проблемы изнашивания экономайзерных труб котельных агрегатов, работающих на пылевидном топливе. Так, например, при сжигании эстонских горючих сланцев износ экономайзерных труб в некоторых случаях превышает расчетный износ в 50 раз. Как показали исследования по изнашиванию экономайзерных труб, в этом процессе, кроме механического износа, имеют большое значение также коррозионные процессы, вызванные дымовыми газами и летучей золой. Это явление имеет место как при сжигании бурых углей, так и при сжигании горючих сланцев [1, 2].

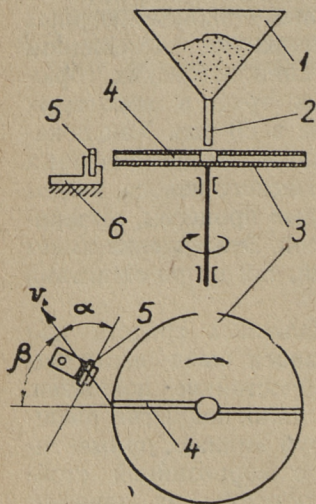
Одновременно с применением различных средств для защиты экономайзерных труб от износа были испытаны также и износостойкие и коррозионностойкие покрытия. Сравнительно хорошие результаты дало покрытие внешней поверхности экономайзерных труб эмалью, примененное на ТЭЦ Кохтла-Ярве. В связи с коррозионной стойкостью эмалевых покрытий, срок службы их зависит, главным образом, от их сопротивляемости ударам частиц летучей золы в специфических условиях экономайзера.

Насколько известно авторам настоящей работы, вопрос о механической устойчивости эмалевых покрытий в абразивной струе еще не исследовался. В технической литературе встречаются лишь упоминания об истирании эмалевых покрытий, подвергнутых воздействию струи песка, свободно падающей с малой скоростью при комнатной

температуре [3, 4]. Поэтому на кафедре деталей машин Таллинского политехнического института в лаборатории износа было проведено экспериментальное исследование, целью которого явилось изучение износостойкости эмалевых покрытий при режимах, близких к условиям экономайзера. Авторы не ставили перед собой задачу составления новых рецептов износостойких эмалей, а только исследовали сопротивление изнашиванию тех марок эмалей, которые по своим механическим и технологическим качествам получили в Советском Союзе хорошую оценку.

## 2. Методика исследования

Испытания износостойкости эмалевых покрытий проводились на ускорителе центробежного типа, схема которого воспроизведена на фиг. 1.



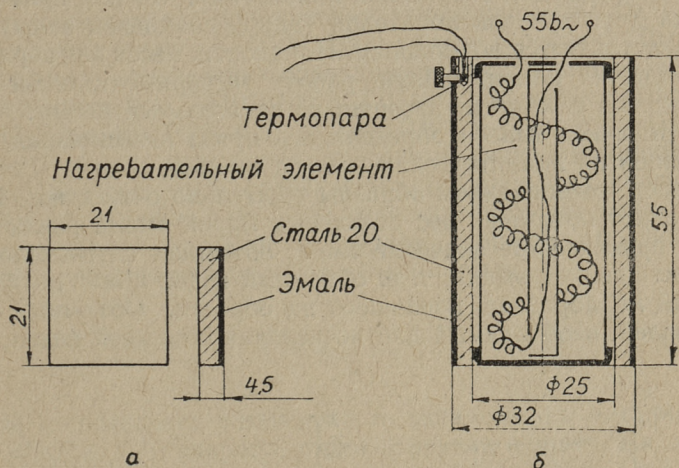
Фиг. 1.  
Схема  
центробежного  
ускорителя

Абразив в строго определенном количестве закладывается в бункер 1 машины, откуда по резиновому питательному шлангу 2 направляется в центральное отверстие ротора 3. Под влиянием центробежной силы абразивные частицы, проходя по радиальным каналам 4, выходят из ротора под углом  $\beta$  со скоростью  $v$ . Испытываемые образцы 5 (общим количеством до 60 штук) закрепляются



в держателях 6, концентрично расположенных вокруг ротора. Для изменения угла атаки между абразивной струей и поверхностью образцов, держатели прикрепляются в разных положениях вокруг вертикальной оси. Защита плоских образцов от действия рикошетных частиц абразива достигается путем применения специальных защитных чехлов из тонкого листового железа, оставляющих непокрытой только фронтальную поверхность образцов.

Детальное описание центробежного ускорителя приведено в работе [5].



Фиг. 2. Образцы:

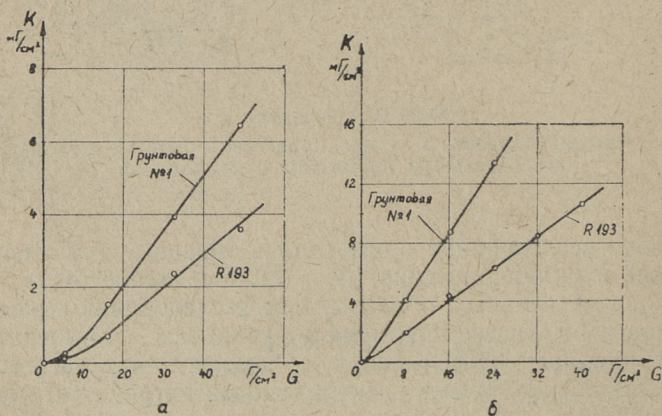
а — плоский образец, б — цилиндрический образец вместе с нагревательным элементом и термопарой

В ходе исследования применялись образцы двух типов: плоские и цилиндрические (фиг. 2). Последние были использованы, главным образом, при исследовании износостойкости эмалевых покрытий в условиях повышенных температур (до  $350^{\circ}\text{C}$ ), которые достигались нагревом образцов специальными электрическими нагревательными элементами.

Средняя температура стенки образца определялась термопарой, установленной в специально для этого выверленном отверстии.

В качестве абразива в настоящей работе был использован кварцевый песок, высушенный и просеянный на фракции 0,16... 0,31, 0,31... 0,40 и 0,40... 0,63 мм. Применение кварцевого песка в качестве абразива было вызвано тем обстоятельством, что изнашивающее действие кварцевого песка гораздо выше, чем изнашивающее действие золы. Так, износ от песка при  $v = 16$  м/сек больше износа от золы примерно в 20 раз. Это обстоятельство позволило сократить время испытания на изнашивание. Кроме того, использование кварцевого песка дало возможность определить действительную скорость абразивных частиц методом скоростной киносъемки, что при применении других видов абразивов (напр., сланцевой золы) не представляется возможным. И, наконец, песок как абразив обеспечил бесперебойную работу экспериментальной установки, т. к. он не засоряет ее питательный шланг.

Величина износа определялась путем взвешивания образцов на аналитических весах с точностью до  $\pm 0,2$  мг. Перед взвешиванием образцы тщательно очищались. Поскольку объемный вес отдельных марок эмали различен, то практическое значение имеет объемная интенсивность изнашивания эмали, т. е. объемный износ в  $мм^3$  на каждый кг абразива, попавшего на образец. Объемный вес эмалей, необходимый для исчисления объемной интенсив-



Фиг. 3. Зависимость износа от количества абразива на один квадратный сантиметр поверхности образца:  
 а — при угле атаки  $38^\circ$ , б — при угле атаки  $90^\circ$



ности изнашивания, определялся экспериментально для каждой марки в отдельности.

Как явствует из опытов, проведенных для уточнения методики (фиг. 3), интенсивность изнашивания эмалевых покрытий в начальной стадии износа зависит от количества абразива, попавшего на образец (в особенности при малых углах атаки). Поэтому все образцы прирабатывались вплоть до установившегося режима изнашивания. Особенность работы центробежного ускорителя такова, что количество ударов на образец и угол атаки зависят от угла вылета  $\beta$  (см. фиг. 1). Угол вылета и скорость абразивных частиц при ударе  $v$  определялись путем скоростных киносъемок с применением кинокамеры СКС1м. Скорость киносъемок — 2500...3500 кадров в секунду. Вышеуказанное определение проводилось для фракций кварцевого песка 0,31...0,40 и 0,60...1,0 мм. Что касается фракций абразива 0,16...0,31 и 0,40...0,63, то скорость вылета частиц была определена косвенным методом, принцип которого состоит в следующем. На основании предыдущих исследований [6, 7, 8] известно, что интенсивность изнашивания металлов и средняя скорость абразивной струи связаны между собой зависимостью

$$k = av^m, \quad (1)$$

где  $k$  обозначает интенсивность изнашивания металлов в  $\text{мм}^3/\text{кг}$  и  $v$  — скорость струи абразива в  $\text{м}/\text{сек}$ . На основании ранее проведенных измерений при стали Ст.3 показатель степени  $m = 2,3$ . При этом было установлено, что в пределах использованных фракций интенсивность изнашивания металла практически не зависит от величины абразивных частиц [8]. Так как множитель  $a$  при использовании кварцевого песка зависит только от угла атаки, то при применении фракции 0,16...0,31 имеет место зависимость

$$v_{0,16...0,31} = \left( \frac{k_{0,16...0,31}}{k_{0,31...0,40}} \right)^{\frac{1}{2,3}} v_{0,31...0,40}. \quad (2)$$

Скорости, применяемые в настоящем исследовании, указаны в таблице 1.

Таблица 1

Средние скорости удара абразивных частиц (м/сек)

Скорость вращения ротора (об/мин)	765	1240	1615	1775
0,16...0,31	16	26	33	36
фракции 0,31...0,40	17	27	34	37
0,40...0,63	17	28	35	38

## 3. Испытываемые эмали

Для приготовления испытываемых эмалей применялись фритты, химический состав которых приведен в таблице 2.

Таблица 2

Химические составы фритт

Компоненты	Содержание, %							
	Фрит- та 20/15	Фрит- та 35	Фрит- та 31/32	Фрит- та R 173	Фрит- та R 193	Фрит- та T-21	Фрит- та K-1	Фрит- та 105 T
$SiO_2$	47,9	57,9	45,1	38,5	44,2	49,9	68,5	62,5
$B_2O_3$	17,1		26,8	19,7	18,5	5,0	2,0	2,0
$Na_2O$	13,2	21,9	12,2	11,1	10,5	13,6	19,0	19,0
$Al_2O_3$	7,7	1,8	2,0	3,1		9,1	4,0	4,0
$K_2O$	3,5	2,0	1,2			5,1		
$CaO$	4,0		1,0				4,5	4,5
$Fe_2O_3$	0,2	0,4						
$CaF_2$	0,3	7,4	3,7					
$NiO$	0,5	1,4						
$MnO_2$	1,5	1,2						
$Na_2SiF_6$	4,1	6,0			8,4			
$Co_2O_3$			1,8					
$Ni_2O_3$			0,6					
$MnO$			0,6					
$TiO_2$			5,0	17,3	18,4	17,3	2,0	8,0
$P_2O_5$				2,4				
$MgO$				1,5				
$Na_3AlF_6$				6,4				

На базе приведенных фритт изготовлялись следующие эмали (см. таблицу 3).

Покрытие эмалью образцов, изготовленных из стали 20, проводилось по обычной технологии, применяемой при эмалировании малоуглеродистой стали.



## Составы шликеров эмалей

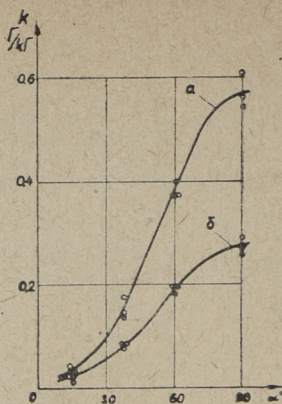
Компоненты	Содержание, кг						
	Грунтовая эмаль № 1	Грунтовая эмаль № 2	Покровная эмаль R173	Покровная эмаль R193	Покровная эмаль T-21	Покровная эмаль K-1	Покровная эмаль 105T
Фритта 20/15	65	70					
Фритта 35	25						
Фритта 31/32		30					
Фритта R173			90				
Фритта R193				90			
Фритта T21					90		
Фритта K-1						100	
Фритта 105T							100
Глина	4	9	5,5	5,5	5	2,5	2,5
Бура	0,7						
Молотый кварц		40					
Молибденовая кислота		0,3				0,5	0,5
Поташ			0,15	0,15	0,2		
Молибдат аммония						0,2	0,2
Вода	47	48	38	38	38	46	46
Объемный вес покрытий, Г/см <sup>3</sup>	2,40	2,00	2,20	2,20	2,25	2,37	2,22

## 4. Результаты испытаний

## а) Зависимость интенсивности изнашивания от угла атаки

Влияние угла атаки на интенсивность изнашивания исследовалось по двум маркам эмали — грунтовая эмаль № 1 и покровная эмаль R 193. Испытания проводились при средней скорости струи в 26 м/сек (фракция абразива 0,16...0,31 мм). Углы атаки были избраны в 15°, 38°, 60° и 90°, причем при каждом угле атаки испытывались 3 образца. Результаты испытаний приведены на фиг. 4. Как видно из графика, максимум интенсивности изнашивания наблюдается при угле атаки  $\alpha = 90^\circ$ . Эти результаты совпадают с результатами испытаний сталей, пока-

завшими, что с увеличением хрупкости стали угол атаки, соответствующий максимуму интенсивности изнашивания, приближается к  $90^\circ$ . Полученные результаты подтверждает также и практика эксплуатации экономайзерных труб, а именно: эмалевое покрытие более интенсивно изнашивается в лобовой части труб.



Фиг. 4. Зависимость интенсивности изнашивания от угла атаки: а — грунт, эмаль № 1 и б — эмаль R193

#### б) Зависимость интенсивности изнашивания от скорости струи абразива

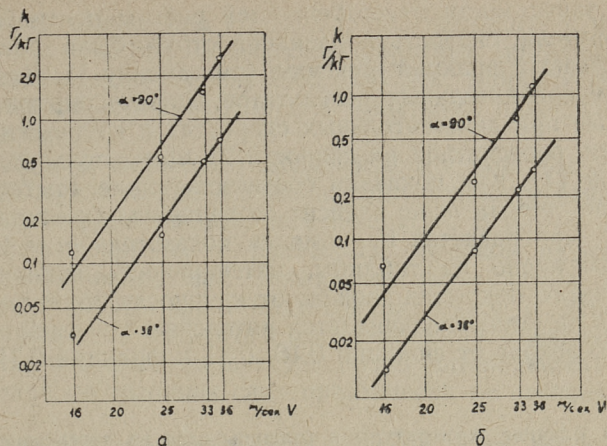
Эти испытания проводились с теми же марками эмали и с той же фракцией абразива, что и предыдущие. Скорость струи была изменена в пределах  $16...36$  м/сек. Испытания проводились с плоскими и цилиндрическими образцами при комнатной температуре.

Углы атаки для испытания плоских образцов были избраны в  $38^\circ$  и  $90^\circ$ . Результаты испытания приведены на фиг. 5, где средние арифметические значения скоростей и интенсивности изнашивания показаны в логарифмических координатах. Полученную закономерность можно выразить в виде эмпирической зависимости  $k = av^m$ , действующей и при изнашивании стали. Показатель степени при обеих испытанных марках эмали колеблется в пределах от 4,0 до 4,5 (при стали, в зависимости от пластичности,  $m = 2,3...2,5$ ).

#### в) Зависимость интенсивности изнашивания от величины абразивных частиц

Испытывались грунтовая эмаль № 1 и покровная эмаль R193, которыми были покрыты плоские образцы. Скорость вращения ротора ускорителя равнялась  $1240$  об/мин. При-





Фиг. 5. Зависимость интенсивности изнашивания от скорости струи:  
 а — в случае грунтовой эмали № 1, б — в случае покровной эмали R193

менялись следующие фракции кварцевого песка: 0,16...0,31 мм, 0,31...0,40 мм и 0,40...0,63 мм. Каждой фракцией испытывалось по три образца. Средние результаты испытаний показаны в таблице 4.

Таблица 4

Средние интенсивности изнашивания ( $\Gamma/\kappa\Gamma$ ) при различных фракциях абразива

Фракция песка, мм	Средняя приведенная скорость струи, м/сек	Интенсивность изнашивания, $\Gamma/\kappa\Gamma$	
		Грунтовая эмаль № 1 $\alpha=38^\circ$	Покровная эмаль R193 $\alpha=90^\circ$
0,16...0,31	26	0,149	0,251
0,31...0,40	26	0,471	0,497
0,40...0,63	26	0,539	0,596

В зависимости от особенностей работы центробежного ускорителя, скорость абразивной струи была различная для разных фракций абразива (см таблицу 1). Для получения сравнительных результатов, данные опытов, полученные при действительных скоростях с крупными фракциями, пересчитали на скорость 26 м/сек, пользуясь формулой (1). Как показали соответствующие опыты, показатель степени  $m$  не зависит от величины фракции абразива. При расчетах принимался показатель  $m = 4,5$ .

Как видно из таблицы, интенсивность изнашивания эмалевого покрытия зависит от крупности абразива. Особенно заметно увеличивается интенсивность изнашивания при переходе от фракции 0,16...0,31 к фракции 0,31...0,40.

#### г) Влияние температуры и толщины слоя на интенсивность изнашивания

При настоящих экспериментах использовалась грунтовая эмаль № 1, так как при прежних промышленных испытаниях в котлоагрегате была использована та же марка эмали. Образцы были избраны цилиндрической формы (фиг. 2, б), причем первая партия образцов покрывалась одним слоем эмали, вторая партия — двойным слоем, а третья партия — тройным слоем эмали. Толщина эмалевого покрытия была соответственно 0,10...0,15, 0,25...0,30 и 0,40...0,50 мм. Испытания проводились при температуре 20 и 350°C. Некоторые контрольные испытания были выполнены при температуре 200...250°C. Они показали,

Таблица 5

Интенсивности изнашивания цилиндрических образцов, покрытых грунтовой эмалью № 1 (мм<sup>3</sup>/кг), при разной температуре

№ опыта	Температура 20°C			Температура 350°C		
	Количество слоев эмали			Количество слоев эмали		
	1	2	3	1	2	3
1	167	292	292	417	263	358
2	188	259	259	320	263	300
3	158	292	259	267	288	263
4	254	280	259	356	275	392
5	200	326	209	368	300	288
6	213	267	300	310	326	254



что размер износа при  $t = 200...250^{\circ}\text{C}$  совпадает с износом при  $t = 350^{\circ}\text{C}$ . В качестве абразива применялась фракция кварцевого песка 0,16...0,31 мм, скорость струи равнялась 26 м/сек. Результаты испытаний приведены в таблице 5.

Из таблицы видно, что повышение температуры от 20 до 350°C существенно влияет на интенсивность изнашивания только при однослойном покрытии. В случае многослойного покрытия у некоторых образцов интенсивность изнашивания при повышении температуры даже уменьшалась. Этот факт подтвердили также и испытания, проведенные с другими марками эмали. Необходимо отметить, что при температуре 350°C интенсивность изнашивания от толщины слоя практически не зависит.

#### д) Сравнение износостойкости различных марок эмали

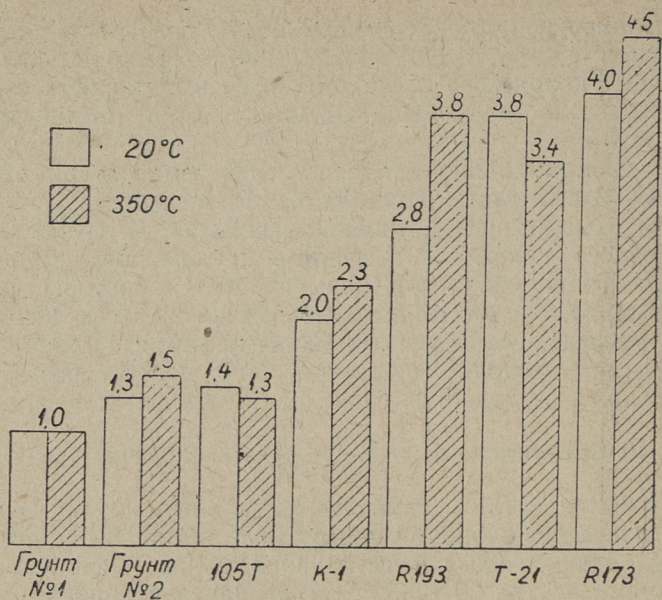
Чтобы определить наиболее подходящую марку эмали для покрытия экономайзерных труб котла, были проведены сравнительные испытания различных марок эмали при температуре 20 и 350°C, с фракцией кварцевого песка 0,16...0,31 мм и со скоростью абразивной струи 26 м/сек. Средние результаты испытаний приведены в таблице 6.

Таблица 6  
Сравнительные испытания интенсивности изнашивания марок эмали

Температура испытания	Интенсивности изнашивания, мм <sup>3</sup> /кг							
	Грунт. эмаль № 1 2X	Грунт. эмаль № 2 2X	Грунт. эмаль № 2 + покр. эмаль К-1	Грунт. эмаль № 2 + покр. эмаль 105Т	Грунт. эмаль № 2 + покр. эмаль Т-21	Грунт. эмаль № 2 + покр. эмаль R173	Грунт. эмаль № 2 + покр. эмаль R193	
20°C	286	224	142	203	76	72	101	
350°C	286	190	122	215	85	63	75	

Для большей полноты обзора, на фиг. 6 приведена диаграмма, показывающая износостойкость марок эмали по сравнению с износостойкостью грунтовой эмали № 1.

Чтобы получить представление о механической износостойкости эмали по сравнению с износостойкостью ко-



Фиг. 6. Относительные объемные износостойкости различных марок эмалей при температурах 20 и 350°C

тельной стали в условиях, соответствующих условиям работы экономайзера, были проведены сравнительные испытания, при которых в качестве абразива использовалась крупная фракция циклонной золы ТЭЦ Кохтла-Ярве. Последняя была получена путем воздушной сепарации циклонной золы, зернистость которой показана в таблице 7.

Таблица 7

Фракционный состав золы

Фракция, мк	> 90	90...60	60...30	< 30
Содерж., %	14,7	11,5	30,3	43,5

Испытывались два вида отрезков труб: отрезки из котельной стали и отрезки, покрытые покровной эмалью R173 (фиг. 2,б). Скорость вращения ротора равнялась 765 оборотам в минуту, что дает скорость струи золы



13...15 м/сек. Испытания показали, что весовой износ обоих видов отрезков труб примерно одинаков. Учитывая соотношение объемных весов стали и эмали, объемный износ эмалевых покрытий оказался примерно в 3,5 раза больше износа стали. То обстоятельство, что показатель степени в формуле (1) заметно меньше при котельной стали, чем при эмали (соответственно  $m=2, 3$  и  $m=4...4,5$ ), позволяет предполагать, что при скоростях струи ниже 10 м/сек лучшие эмали по своей механической износостойкости не уступают котельной стали. При этом предполагается, что значение показателя степени в формуле (1) при использовании в качестве абразива золы существенно не отличается от значения показателя степени в случае применения песка.

### 5. О механизме изнашивания эмалевых покрытий

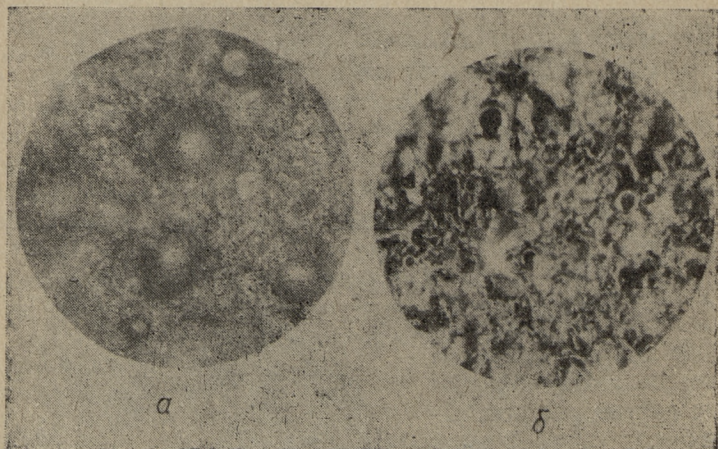
Характер изнашивания эмалевых покрытий был в основном исследован путем микроскопного наблюдения и фотографирования. Наблюдения за следами ударов, полученных в различных условиях, показали, что эти следы состоят из т. н. центров попаданий (где эмалевое покрытие под непосредственным воздействием от удара частицы превратилось в порошок) и из окружающих их кратеров, образовавшихся в связи с вылетом осколков из эмалевого покрытия. Образование кратеров вызвано вклиниванием абразивных частиц, проникающих до определенной глубины в эмалевое покрытие. Во многих случаях при первом же ударе происходит только растрескивание поверхности покрытия, без образования осколков эмали (фиг. 7). Измерения следов ударов, проведенные с по-



Фиг. 7. Типичный след удара на поверхности грунтовой эмали № 1. Стрелкой показан центр попадания.  
× 200

мощью измерительного микроскопа, показали, что глубина следа в 10...20 раз меньше его средней ширины и длины. Таким образом осколки эмали, отделяющиеся от поверхности покрытия, очень тонки. Так, например, при грунтовой эмали № 1 (фракция песка 0,31...0,40,  $v=26$  м/сек,  $\alpha=90^\circ$ ) глубина следа от удара составила 4...20 мк. При покровной эмали R193 при прочих равных условиях эта глубина следа была только 1...10 мк.

Из этого ясно, что слой эмали, толщина которого составляет не менее 100 мк, при первых же ударах не уничтожается, а во время испытаний этих труб происходит длительный и равномерный износ покрытия. Тем более характерен такой износ при экономайзерных трубах котла, где скорость движения абразива и размер частиц его, а также абразивность частиц гораздо меньше, чем при наших опытах.



Фиг. 8. Изношенные поверхности образцов,  $\times 130$ :  
а — грунтовой эмали № 1, б — покровной эмали К-1

В процессе исследования следов от ударов при небольших углах атаки выяснилось еще и то обстоятельство, что форма их незакономерна и от направления полета частиц абразива не зависит. Таким образом, здесь полностью отсутствует явление резания поверхности, имеющее место



при изнашивании металлов. Форма следа от удара зависит, по всей вероятности, только от формы абразивных частиц, от внутренних напряжений эмали и распределения дефектов, имеющих в верхних слоях покрытия. Большое значение имеет при этом пористость покрытия. Проведенные испытания показали, что износостойкость покрытия тем меньше, чем больше пористость. Интенсивное изнашивание испытываемых образцов, покрытых только грунтовой эмалью, обусловлено, по всей вероятности, именно повышенной пористостью этих покрытий (фиг. 8). Характерно, что покровные эмали R173 и R193, давшие наилучшие результаты, отличаются наименьшей пористостью. Так называемый эффект приработки (см. фиг. 3), т. е. большая износостойкость начальной поверхности эмалевого покрытия при малых углах атаки, объясняется также отсутствием пор на ней.

Следует отметить, что различная пористость покрытия одной и той же марки эмали вызвала при испытаниях довольно большую разбросанность результатов измерений. Поэтому проведенные опыты еще не позволяют сделать определенный вывод о том, чем вызвано повышение износостойкости некоторых марок эмали при температуре 350°C (см. табл. 6), — изменением ли свойств покрытий или же разбросанностью результатов испытаний.

### Заключение

Испытания, проведенные в ходе данной исследовательской работы, приводят к следующим выводам.

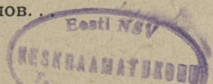
1. Интенсивность изнашивания эмалевых покрытий является максимальной при угле атаки  $\alpha = 90^\circ$ .

2. Интенсивность изнашивания ( $мм^3/кг$ ) эмалевых покрытий пропорциональна степени 4...4,5 скорости струи абразива.

3. Интенсивность изнашивания эмалевых покрытий возрастает при увеличении массы абразивных частиц.

4. Интенсивность изнашивания эмалевых покрытий при температуре 350°C существенно не отличается от интенсивности изнашивания при комнатной температуре.

5. Износостойкость эмалевых покрытий в струе абразива во многом зависит от их пористости: при увеличении пористости заметно возрастает и интенсивность изнашивания.



6. В отношении износостойкости наилучшие результаты при  $t=350^{\circ}\text{C}$  дали белые покровные титановые эмали R173 и R193.

Исходя из вышеприведенных результатов, при использовании эмалевых защитных покрытий экономайзерных труб рекомендуется следующее:

а) отделять от дымовых газов крупные фракции золы (например, в соответствующих инерционных камерах);

б) обеспечивать умеренную среднюю скорость дымовых газов, проходящих пучки экономайзерных труб, и не допускать местных пиков в поле скоростей;

в) для эмалирования желательно использовать покровную эмаль R173 или R193. Оптимальной толщиной слоя ее следует считать 0,5...1,0 мм;

г) при эмалировании желательно применять технологию, позволяющую избежать большой пористости покрытия (например, обжиг эмали высокочастотным током);

д) так как практическое применение эмалевой защиты показало, что в местах, случайно не покрытых эмалью или в местах с повреждением (царапины эмали и т. д.) изнашивание происходит особенно интенсивно, необходимо тщательно проверять качество эмалирования труб и принимать все меры, чтобы избежать механического повреждения эмалевых покрытий как при транспортировке, так и при монтаже труб.

В заключение следует отметить, что сравнительные испытания, проведенные ассистентом кафедры теплоэнергетики Таллинского политехнического института Х. Роорайдом показали, что коэффициент теплопередачи покрытых эмалью труб превышает коэффициент теплопередачи непокрытых труб в случае поперечного обтекания воздухом при естественной конвекции на 6...17,5% и при принудительной конвекции — на 1...3%. Опыты были проведены при следующих температурах: температура стенки эмалированной трубы 26...73 $^{\circ}\text{C}$ , температура воздуха — 10...19 $^{\circ}\text{C}$ .



## ЛИТЕРАТУРА

1. О. Н. Муравкин, А. В. Рябченков. Сб. Трение и износ в машинах, № 11, АН СССР, Москва, 1956.
2. И. П. Эпик. «Электрические станции», № 2, 1958.
3. А. Пецольд. Эмаль. Москва, 1958.
4. В. В. Варгин, Е. А. Антонова и др. Технология эмали и эмалирования металлов. Москва, 1958.
5. И. Клейс. Труды Таллинского политехнического института. Серия А, № 152, 1958.
6. K. Wellinger, H. Uetz, VDI — Forschungsheft, Aug. B. 21 (449), 1955.
7. В. Н. Кащеев. Изв. ВУЗ'ов, «Энергетика», № 3, 1959.
8. И. Клейс. Труды Таллинского политехнического института, Серия А, № 168, 1959.

## РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В МЕТАЛЛЕ ПРИ ИЗНАШИВАНИИ В СТРУЕ АБРАЗИВА

### 1. Условия испытаний на изнашивание

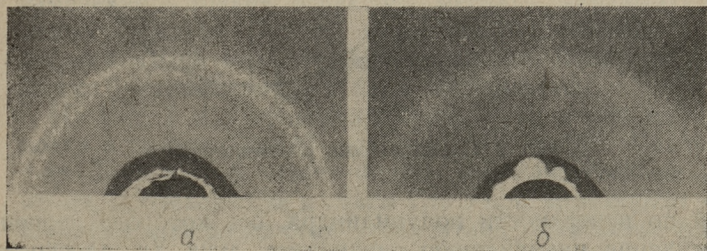
Для выявления изменений, происходящих в кристаллической решетке металла при изнашивании в абразивной струе, в качестве исследуемого материала использовалась сталь марки Ст. 3. Для рентгенографирования изготавливались образцы размером  $12 \times 8 \times 4$  мм, которые подвергались предварительному высокому отпуску при температуре  $650^\circ\text{C}$  в течение 1 часа для снятия наклепа от механической обработки. Во избежание возникновения термических напряжений охлаждение образцов производилось вместе с печью. Образовавшийся слой окалины удалялся путем травления образцов в растворе серной кислоты. Испытание на изнашивание проводилось в центробежной машине-ускорителе, которая подробно описана в труде [1]. Опыты проводили при углах атаки  $20^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $90^\circ$ . Скорость абразивной струи —  $81$  м/сек. В качестве абразивного материала применяли сухой кварцевый песок крупностью  $0,3...0,6$  мм.

### 2. Рентгенографирование образцов

Для выявления качественных изменений в кристаллической решетке, происходящих в процессе износа, производилась обратная съемка образцов в камере типа КРОС-1 на плоскую пленку. В качестве источника рентгеновских лучей использовалась трубка типа БСВ-4 с кобальтовым антикатодом. При рентгенографировании снималось кольцо отражения от кристаллографической плоскости (310).



Для выявления качественных изменений, происходящих в блочной структуре металла при ударном износе, образец при съемке оставался неподвижным. Как показали результаты предварительных исследований полученных рентгенограмм, в процессе износа имеет место сильное размытие колец отражения (фиг. 1.).



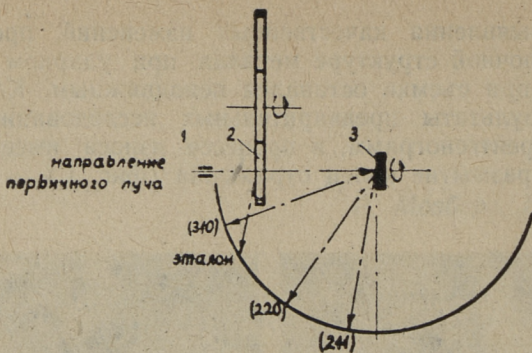
Фиг. 1. Кольца отражения: а) исходное состояние, б) после изнашивания при угле  $45^\circ$

Учитывая, что размытие линий рентгенограмм в общем случае может быть обусловлено как дроблением мозаичных блоков, так и искажениями второго рода, была предпринята попытка выяснить, какими факторами обусловлено размытие линий в данном случае.

Для решения этого вопроса за основу было взято известное положение о различной угловой зависимости величины размытия линий от искажений второго рода и от дробления блоков мозаики, а именно: величина размытия линий рентгенограмм от искажений второго рода пропорциональна тангенсу, а от дробления блоков мозаики — секансу угла отражения.

Для получения на рентгенограмме линий с отличными углами отражения была использована ранее сконструированная нами рентгеновская камера [2], принцип работы которой заключается в следующем (см. фиг. 2).

Первичный пучок рентгеновских лучей, пройдя диафрагму 1, попадает на образец 3 или на эталонную крестообразную пластинку 2. Отразившись от кристаллографических плоскостей материала образца или эталона, рентгеновский луч дает ряд линий на пленке, расположен-



Фиг. 2. Схема съемки рентгенограмм

ной по поверхности полуцилиндра, ось которого перпендикулярна направлению первичного луча (и плоскости рисунка). Образец 3 устанавливался на оси кассеты, причем плоскость образца была перпендикулярна направлению первичного луча. При таком расположении образца на пленку улавливались все линии отражения в интервале углов  $176^\circ > 2\theta > 90^\circ$ . При трубке с кобальтовым антикатодом индексы получаемых линий были (211), (220) и (310).

Назначение эталона заключалось в том, чтобы при съемке получить на пленке одновременно с линиями образца также и линии эталона. Это создавало возможность оценки изменения абсолютной интенсивности рентгеновских линий образца после различных этапов абразивного изнашивания.

Сущность съемки с эталоном заключается в том, что первичный луч при вращении крестообразного эталона либо облучает эталон, либо образец. За один оборот эталона, вращающегося со скоростью 60 об/мин, первичный луч примерно 0,3 сек облучает эталон и 0,7 сек образец.

Фотометрирование рентгенограмм производилось на микрофотометре типа МФ-2 при размерах щели  $0,2 \times 1,2$  мм. За значение интенсивности линий принималась величина, равная отношению интенсивности линий образца  $I_{(hkl)}$  к интенсивности линии эталона  $I_e$ . Ширина линии на полученных микрофотограммах измерялась по методу Д. М. Васильева [3] с учетом поправки на перекрытие от размытия  $K_{\alpha_1}$  и  $K_{\alpha_2}$  линий дублета  $K_{\alpha}$ .



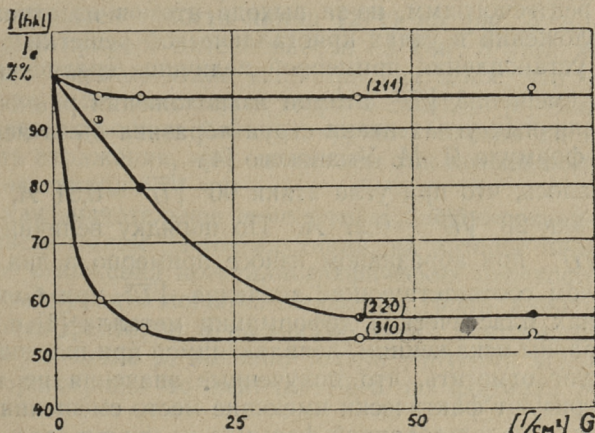
### 3. Результаты исследования и их обсуждение

На фиг. 3 и 4 представлены кривые изменения интенсивности и ширины линий на различных этапах изнашивания при угле атаки  $90^\circ$  (на горизонтальной оси отмечено количество абразивных частиц в граммах, которым изнашивался  $1 \text{ см}^2$  поверхности образца).

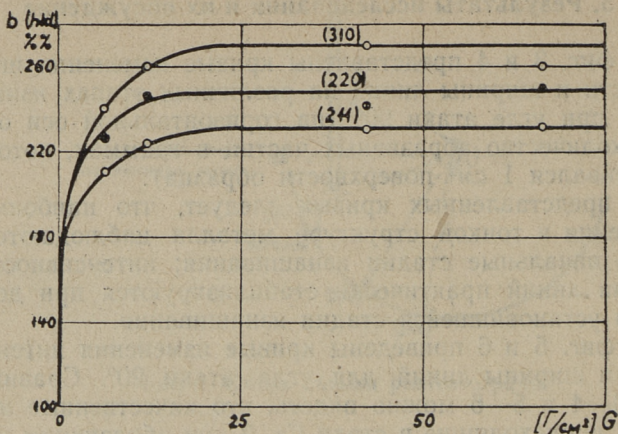
Из представленных кривых следует, что наибольшие изменения в тонкой структуре металла наблюдаются в самые начальные стадии изнашивания; интенсивности и ширина линий практически стабилизируются при достижении установившейся стадии изнашивания.

На фиг. 5 и 6 приведены кривые изменения интенсивности и ширины линий для угла атаки  $20^\circ$ . Сравнивая фиг. 3—4 и 5—6 можно видеть, что качественные изменения, происходящие в стали Ст. 3 при абразивном изнашивании при различных углах атаки одинаковы, однако количественно изменения в тонкой структуре при больших углах атаки выражены значительно сильнее.

Переходя к анализу полученных результатов рентгенографических исследований можно заключить, что при изнашивании в струе абразива наблюдаются весьма значи-



Фиг. 3. Изменение интенсивности линий рентгенограмм в зависимости от количества абразива на один квадратный сантиметр поверхности образца. Угол атаки  $90^\circ$



Фиг. 4. Изменение ширины линий рентгнограмм в зависимости от количества абразива на один квадратный сантиметр поверхности образца. Угол атаки  $90^\circ$ .

тельные искажения в расположении атомов в углах кристаллической решетки (искажения третьего рода), на что указывает факт значительного снижения интенсивности линий рентгенограмм, из-за выхода атомов из отражающих положений в узлах кристаллической решетки.

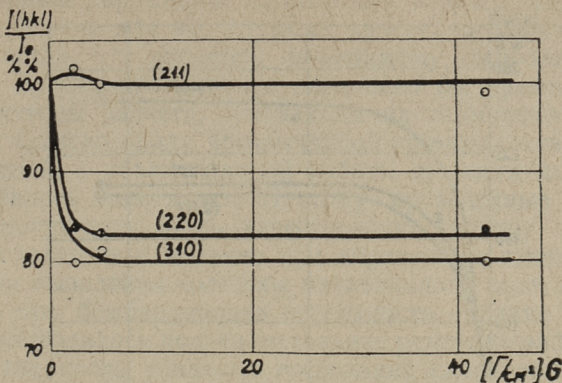
Для установления примерной величины среднеквадратичных смещений  $\sqrt{\bar{u}^2}$  атомов из положения равновесия при различных углах атаки струи абразива была использована формула Я. М. Уманского [4].

Оказалось, что при угле атаки  $90^\circ$   $\sqrt{\bar{u}^2} = 0,31 \text{ \AA}$ , при угле атаки  $20^\circ$   $\sqrt{\bar{u}^2} = 0,27 \text{ \AA}$ . По порядку величин значения  $\sqrt{\bar{u}^2}$  при абразивном износе примерно в два раза выше, чем соответствующие значения  $\sqrt{\bar{u}^2}$  при больших величинах пластической деформации металла [4] и примерно равны искажениям, появляющимся при питтинге [5].

Следует отметить, что полученные значения не точно характеризуют фактически имеющие место смещения атомов, т. к. в использованной формуле не учитывалось влияние на интенсивность линий эффекта экстинкции от дробления мозаичных блоков.

Размытие пятен отражения, каждое из которых является результатом отражения от отдельных кристаллитов





Фиг. 5. Изменение интенсивности линий рентгенограмм в зависимости от количества абразива на один квадратный сантиметр поверхности образца. Угол атаки  $20^\circ$

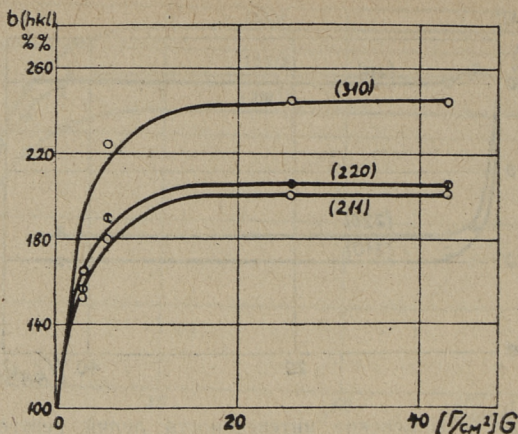
(фиг. 1а) в сплошные кольца отражения (фиг. 1б) после изнашивания дает основание для заключения о происходящем дроблении кристаллитов и блоков мозаики при износе. На этот факт указывает также малая величина снижения интенсивности линии (211) на фиг. 3 и даже некоторый прирост интенсивности на фиг. 5 этой же линии после первого этапа испытания на износ, что можно объяснить в соответствии с теорией Эвальда [6] снижением экранирующего влияния крупных блоков на интенсивность отражения, или снижением так называемого эффекта экстинкции.

Так как значительное измельчение блоков связано также с увеличением размытия линий, на которое влияют и упругие искажения кристаллографических плоскостей, то была предпринята попытка выявления роли каждого из названных факторов в размытии линий рентгенограмм.

Если размытие  $\beta_a$  вызвано только упругими искажениями второго рода, то величина его по формуле Брегга будет

$$\beta_a = \frac{\Delta a}{a} 4R \operatorname{tg} \vartheta, \quad (1)$$

где  $\frac{\Delta a}{a}$  — относительная величина упругих искажений кристаллографических плоскостей,



Фиг. 6. Изменение ширины линий рентгенограмм в зависимости от количества абразива на один квадратный сантиметр поверхности образца. Угол атаки  $20^\circ$

$R$  — радиус камеры,

$\vartheta$  — угол отражения рентгеновского луча.

Если размытие  $\beta_d$  обусловлено только блочной структурой, то его можно установить по формуле Селякова-Шерера

$$\beta_d = \frac{\lambda R}{D \cos \vartheta}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  — длина волны характеристического излучения рентгеновской трубки и

$D$  — средний размер блоков.

Зная значения углов отражения  $\vartheta$  для линий (310), (220) и (211), измеренные расширения этих линий, а также, что форма линий описывается уравнением вида  $y=e^{-kx}$ , была предпринята попытка разделения эффекта размытий от напряжений второго рода и от величины мозаичных блоков по методике, примененной В. Г. Курдюмовым и Л. Н. Лысаком [7] при рентгенографических исследованиях закаленных сталей. Однако удовлетворительных результатов получить не удалось. Встретившиеся неудачи могут быть объяснены как погрешностями при определении ширины линии (211), так и возможным ани-

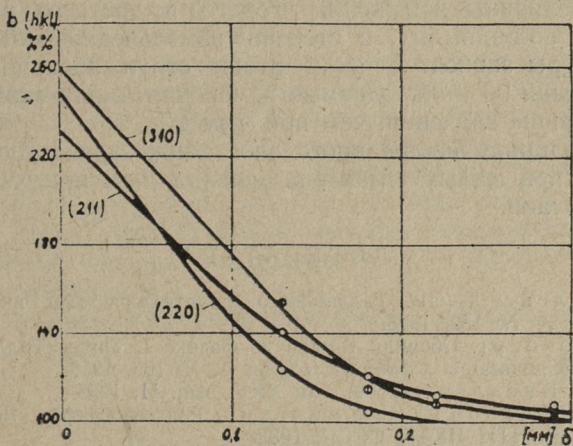


зотропным характером напряжений второго рода и величины блоков для исследуемых кристаллографических направлений, что является, по-видимому, наиболее вероятным. В последнем случае следовало бы применить другие методы расчета, основанные на гармоническом анализе. Однако ввиду чрезвычайной громоздкости этих вычислений, в объеме данной работы провести их не представлялось возможным. Поэтому проведенные наблюдения могут дать лишь качественную картину процессов, происходящих в металле при абразивном изнашивании.

Для выявления толщины наклепанного слоя, возникающего при бомбардировке поверхности образца песчинками, проводилось последовательное рентгенографирование образца после удаления нескольких слоев определенной толщины с его поверхности.

Удаление поверхностного слоя проводилось электрополировкой в хромистом электролите. Толщина образца до и после полировки измерялась микрометром с точностью 0,01 мм.

На фиг. 7 представлены кривые изменения ширины линий рентгенограмм в зависимости от толщины удаленного наклепанного слоя.



Фиг. 7. Изменение ширины линий рентгенограмм в зависимости от толщины удаленного наклепанного слоя  $\delta$

Из рассмотрения приведенных кривых следует, что полное восстановление исходной ширины линий рентнограмм происходит после удаления поверхностного слоя толщиной 0,25 — 0,30 мм и что наибольшие искажения сосредоточены в поверхностном слое толщиной около 0,1 мм.

При угле атаки  $20^\circ$  толщина наклепанного слоя была несколько меньше — порядка 0,15—0,2 мм.

#### 4. Выводы

1. При изнашивании в струе абразива имеет место весьма значительное искажение тонкой структуры металла, которое выражается в отклонении атомов из равновесных положений в узлах кристаллической решетки (искажения третьего рода), возникновении упругих искажений кристаллографических плоскостей (искажения второго рода) и измельчении блочной структуры металла.

2. В стадии неустановившегося процесса изнашивания происходит наращивание вышеназванных искажений, которые стабилизируются к моменту достижения состояния установившейся стадии изнашивания.

3. Величины искажений второго и третьего рода, а также, по-видимому, и степень измельчения мозаичной структуры зависят от угла атаки струи абразива: при угле атаки  $90^\circ$  наблюдаемые изменения имели значительно большие значения, чем при угле  $20^\circ$ .

4. Толщина наклепанного слоя также зависит от угла атаки: при малых углах она меньше, чем при больших углах атаки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. Клейс. Труды Таллинского политехнического института, Серия А, № 152, 1958.
2. Р. Мозберг. Сборник трудов по физике I, Труды Таллинского политехнического института, Серия А, № 156, 1959.
3. Д. М. Васильев. ЖТФ, том XXV, вып. 11, 1955.
4. Г. С. Жданов, Я. С. Уманский. Рентгенография металлов, ч. II, ГОНТИ НКТП СССР, 1938.
5. В. Д. Сергеева, Ю. С. Терминасов. «Изв. вузов — Физика», № 5, 1958.
6. Р. Джеймс. Оптические принципы диффракции рентгеновских лучей, 1950.
7. В. Г. Курдюмов, Л. Н. Лысак. ЖТФ, № 9, 1947.



## О КРИТЕРИЯХ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ И О ВЛИЯНИИ АБСОЛЮТНЫХ РАЗМЕРОВ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ НА АБРАЗИВНОЕ ИЗНАШИВАНИЕ

В машине центробежного действия, сконструированной И. Клейсом [1] для исследования изнашивания металлов в абразивной струе, до сих пор, в соответствии с методикой, им же выработанной, применяются плоские образцы. Но можно пользоваться и цилиндрическими образцами. Как нами установлено, это удобно в тех случаях, когда целью является определение сравнительной износостойкости разных материалов и если нас при этом не интересует угол атаки, при котором имеет место максимум интенсивности изнашивания.

В дальнейшем нормальным принято такое расположение образцов в машине, когда расстояние  $a$  между ротором, подающим абразив, и образцом остается, при разных диаметрах образцов, постоянным (фиг. 1).

Количество абразива, попадающего на цилиндрический образец, пропорционально величине угла попаданий  $\gamma$ . По схеме (фиг. 1) можно вывести зависимости между диаметром образца  $d$  и углами  $\delta_1$  и  $\delta_2$ , определяющими угол попаданий  $\gamma$ .

На основании элементарных геометрических соотношений получается:

$$d = 2 \cdot \frac{R \cos \delta_1 + \frac{R \sin \delta_1}{\operatorname{tg}(\beta - \delta_1)} - (R + a)}{1 - \frac{1}{\sin(\beta - \delta_1)}} \quad (1)$$

и

$$d = 2 \frac{R \cos \delta_2 + \frac{R \sin \delta_2}{\gamma \beta (\beta - \delta_2)} - (R + a)}{1 + \frac{1}{\sin(\beta - \delta_2)}} \quad (2)$$

Угол выхода  $\beta$ , по данным автора установки [1, 2], для кварцевого песка может изменяться в пределах  $50-60^\circ$ . Зависимость угла попаданий  $\gamma$  от диаметра образца  $d$  (в мм), для конструктивных размеров установки  $R = 200$  мм и  $a = 20$  мм, представлена на фиг. 2. Угол попаданий выражается при этом зависимостью

$$\gamma \beta = \frac{d^{0,94}}{q}, \quad (3)$$

где  $q$  — коэффициент, зависящий от угла выхода  $\beta$  (при  $\beta = 50^\circ$ ,  $q_{50} = 2,54$ ; при  $\beta = 60^\circ$ ,  $q_{60} = 2,19$ ).

Таким образом, количество абразива, попадающего на один цилиндрический образец:

$$\text{при } \beta = 50^\circ \quad G_d^{50} = \frac{\gamma_{50}}{360} G = \frac{d^{0,94}}{914} G \text{ кг}, \quad (4)$$

$$\text{при } \beta = 60^\circ \quad G_d^{60} = \frac{\gamma_{60}}{360} G = \frac{d^{0,94}}{789} G \text{ кг}; \quad (5)$$

здесь  $G$  — количество абразива, пропущенного в данном опыте через ротор установки, в кг;

$d$  — диаметр образца, в мм.

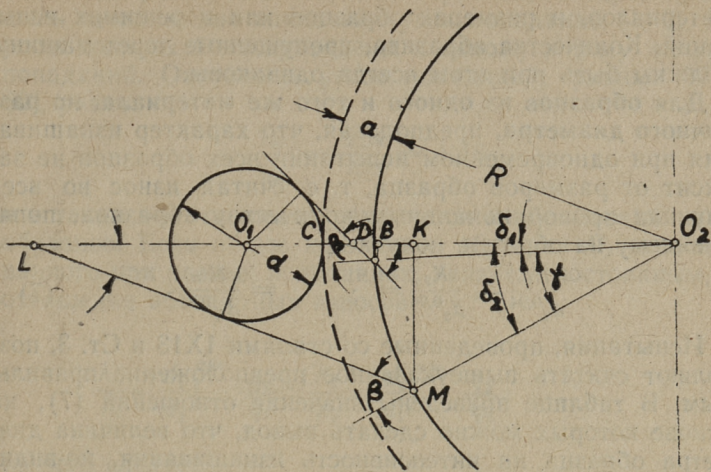
Интенсивность весового изнашивания цилиндрического образца может быть определена из зависимости

$$k_d = \frac{360 K}{\gamma G} = \frac{360 q K}{d^{0,94} G} \text{ мг/кг}, \quad (6)$$

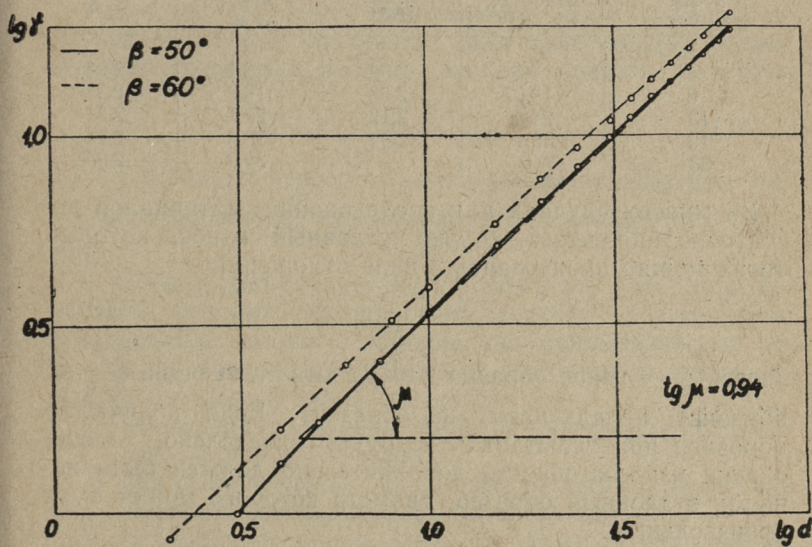
где  $K$  — абсолютный весовой износ образца, в мг.

Для определения относительной износостойкости нет необходимости определять абсолютный износ, а достаточно знать величины, которые легко могут быть сравнены с данными других опытов, проведенных в других условиях. Различия условий опытов при определении износостойкости могут заключаться в применении различных





Фиг. 1. Схема для определения зависимости между углом попаданий и диаметром образца:  $d$  — диаметр образца;  $R$  — радиус ротора машины;  $\gamma = \delta_2 - \delta_1$  — угол попаданий,  $\beta$  — угол выхода



Фиг. 2. Зависимость угла попаданий от диаметра образца

материалов, в размерах образцов или в режимах испытаний. Количества абразива, пропущенные через машину, должны быть при этом всегда одинаковы.

Для образцов из одного и того же материала, но различного диаметра, предполагая, что характер изнашивания при одновременном испытании всех образцов не зависит от размеров образца, т. е. считая износ во всех случаях пропорциональным количеству абразива, попадающему на образец, получаем

$$\frac{K_1}{d_1^{0,94}} = \frac{K_2}{d_2^{0,94}} = \dots = \frac{K_n}{d_n^{0,94}}. \quad (7)$$

Испытания, проведенные со сталями 1X13 и Ст. 3, позволяют считать вышеуказанное предположение правильным. В таблице приведены значения отношений (7), на основе которых можно сделать вывод, что величина диаметра образца на интенсивность изнашивания, по-видимому, не влияет.

Диаметр образца $d$ , в мм	Материал образцов			
	1X13		Ст. 3	
	Абсолютный износ $K$ , в мг	$\frac{K}{d^{0,94}}$	Абсолютный износ $K$ , в мг	$\frac{K}{d^{0,94}}$
4	7,5	2,04	8,1	2,2
8	14,07	2,08	16,3	2,31
13	24,9	2,12	27,1	2,31
19	33,1	2,09	33,9	2,14
23	—	—	39,9	2,09

Во многих случаях для исследования материалов достаточно определить только **условный износ**, который тогда можно представить в виде отношения

$$\Delta = \frac{K}{d^{0,94}} \quad (8)$$

(здесь  $\Delta$  — износ образца в мг, соответствующий  $\frac{G}{60q}$  кг абразива, попадающему на образец). Если количество абразива при испытаниях не будет определено, то для оценки износостойкости дополнительно должен быть испытан эталонный образец, диаметр которого может быть произвольным.

Для сравнения износостойкости образцов при испытаниях в условиях различных режимов (различные abra-



зивы или различные скорости абразива) следует принимать во внимание изменение угла попаданий [1, 2]. Износы должны быть приведены к одному и тому же углу попаданий. Отношение углов попаданий, равных 50 и 60°, равно:

$$\frac{\gamma_{50}}{\gamma_{60}} = \frac{2,54}{2,19} = 1,16$$

и в таком же отношении изменяется и абсолютный износ образцов. Если общее количество абразива  $G$ , использованного при разных испытаниях, является постоянным, то отношения абсолютных износов

$$\frac{K_1}{K_2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{0,94} \cdot \frac{q_2}{q_1}; \quad \frac{K_2}{K_1} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^{0,94} \cdot \frac{q_1}{q_2}; \quad \dots;$$

из чего следует:

$$\frac{K_1 q_1}{d_1^{0,94}} = \frac{K_2 q_2}{d_2^{0,94}} = \dots = \frac{K_n q_n}{d_n^{0,94}} \quad (9)$$

Равенства (9) точно выполняются, если различия режимов испытаний не влияют. Для качественной оценки влияния специфики режима можно сравнить величины

$$\Delta' = \frac{Kq}{d^{0,94}} \quad (10)$$

( $\Delta'$  — условный износ, выражающий износ образца в  $m\Gamma$ , соответствующий  $\frac{G}{360}$   $\kappa\Gamma$  абразива, попадающему на образец).

В итоге можно сделать вывод, что в случаях, когда испытание плоских образцов не является обязательным, исследование весового изнашивания цилиндрических образцов на машине центробежного действия является довольно простым и целесообразным, т. к.

- 1) интенсивность изнашивания не зависит от абсолютных размеров образцов;
- 2) для сравнительных испытаний достаточно вычислить условные износы по формулам (8) или (10);
- 3) изготовление цилиндрических образцов часто менее трудоемко, чем плоских.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Клейс. Машина для исследования изнашивания свободным абразивом. Труды ТПИ № 152, 1958.
2. И. Клейс. Об изнашивании металлов в абразивной струе. Труды ТПИ № 168, 1959.



## УСТАНОВКА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛОВ В АБРАЗИВНОЙ СЫПУЧЕЙ МАССЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

### 1. Введение

В процессе эксплуатации рабочие органы почвообрабатывающих, строительных и транспортных машин, а также некоторые установки химической промышленности подвергаются истирающему действию почвы или других сыпучих материалов. Однако вопросам, связанным с повышением износостойкости рабочих деталей подобных машин, до настоящего времени уделялось недостаточно внимания, к тому же расходятся и мнения отдельных исследователей, разрабатывающих вопрос изнашивания теоретически и практически.

До настоящего времени более подробно изучен вопрос изнашивания при трении металла о закрепленные абразивные частицы. В этих случаях путь трения каждой абразивной частицы относительно испытуемого металла точно определен, причем частица сохраняет свое положение неизменным. Для выяснения этого вида абразивного изнашивания много дали работы М. М. Хрущова и М. А. Бабичева [1].

Твердые минеральные частицы, однако, не всегда сцеплены в монолитное тело, представляя собой непрочно связанную массу (песок, почва, слабый грунт). Можно утверждать, что изнашивание различных сочленений машин свободным абразивом происходит на практике чаще, чем изнашивание о закрепленный абразив.

До сего времени имеется еще сравнительно мало работ по изучению процессов изнашивания свободным абрази-

вом [2, 3, 4, 5, 6], к тому же эти работы освещают только отдельные вопросы этого процесса.

Закономерности изнашивания свободным абразивом носят иной характер, чем закономерности изнашивания закрепленным абразивом, так как при свободном абразиве действие каждого отдельного зерна на изнашиваемый материал различное, в зависимости от его относительного движения.

Чтобы установить эти закономерности, а также содействовать решению проблемы повышения износостойкости рабочих органов машин, соприкасающихся в процессе работы со свободным абразивом, был проведен анализ имеющихся испытательных машин и методов исследования этого вида абразивного изнашивания.

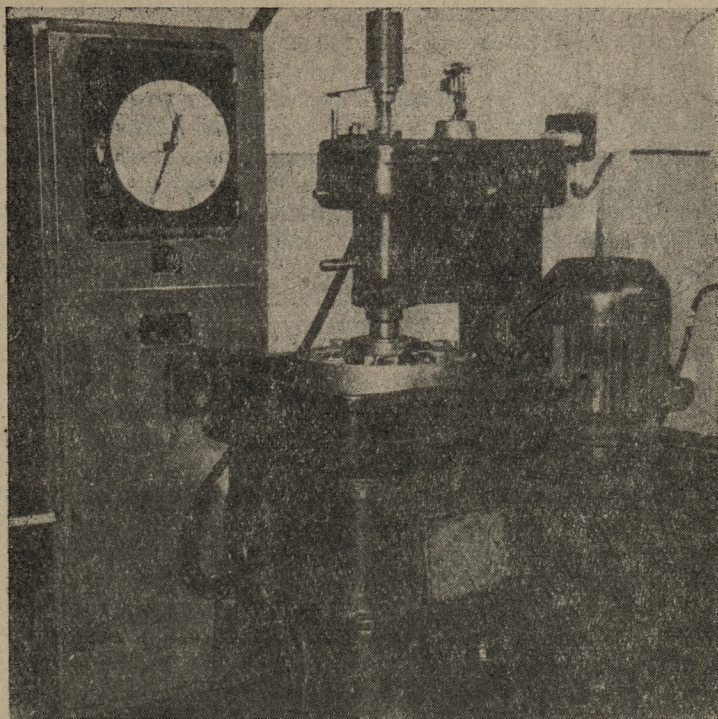
На основании результатов анализа была изготовлена опытная установка и разработана методика исследования изнашивания свободным абразивом. Опытная установка позволяет:

- а) изменять плотность абразивной массы, т. е. давление на изнашиваемую поверхность;
- б) изменять относительную скорость скольжения абразивной массы по изнашиваемой поверхности;
- в) изменять ориентацию изнашиваемой поверхности относительно направления движения абразивной массы;
- г) исследовать процесс изнашивания при различных абразивных массах;
- д) исследовать вопрос изнашивания при различных температурах.

## 2. Опытная установка

Общий вид опытной установки показан на фиг. 1 и схема установки на фиг. 2. Сыпучий абразивный материал 1, используемый при проведении опытов, помещается во вращающийся барабан 2, изготовленный из алюминиевого сплава. Для придания абразивной массе нужной плотности используется центробежная сила. Чтобы во время опыта сыпучий материал не вылетал из барабана, последний снабжен плотно закрывающейся крышкой 3. Для визуального наблюдения при помощи стробоскопа крышка барабана имеет окна, покрытые прозрачной пластмассой.





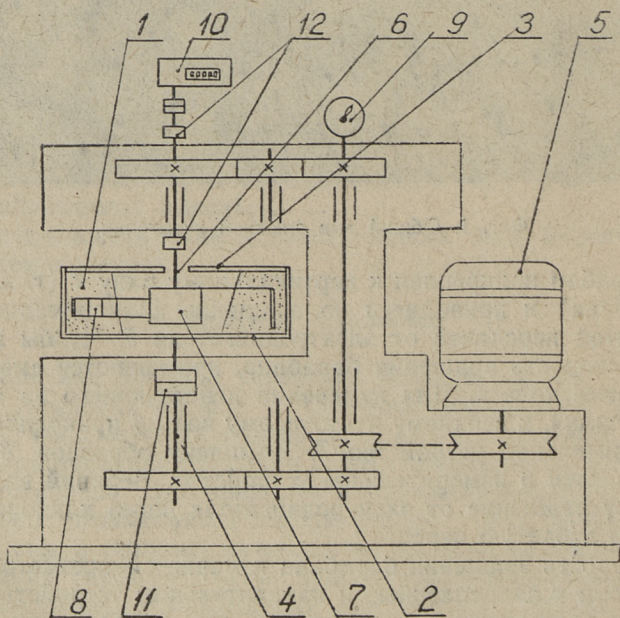
Фиг. 1. Общий вид опытной установки

Барaban прикреплен к вертикальному валу 4 (т. н. вал барабана) и приводится во вращение клиноременной и зубчатой передачей от электродвигателя 5. Чтобы изменить скорость вращения барабана, применяются сменные зубчатые колеса. Для измерения действующего на образец усилия, к верхнему пустотелому валу 6 прикрепляется измерительное устройство 7. Комплект образцов 8 закрепляется в измерительное устройство. Верхний вал получает вращение от электродвигателя через клиноремennую и зубчатую передачу.

Скорость вращения барабана измеряется тахометром 9. Барабан и закрепленные в измерительном устройстве образцы вращаются в одном и том же направлении. Поэтому скорость вращения образцов относительно сыпучего абразивного материала определяется как разница

скоростей вращения барабана и образцов. Так как несущий образцы пустотелый вал и вал барабана связаны между собой зубчатой передачей, то образцы во время установившегося режима перемещаются относительно абразивной массы с постоянной скоростью. Число оборотов образцов относительно барабана определяется счетчиком 10.

Для проведения опытов при повышенных температурах боковая поверхность барабана снабжена электрическими нагревателями. Электрический ток подается к нагревателям через коллекторные кольца 11. За счет нагрева барабана можно повысить температуру абразива, находящегося в барабане. Поддержание температуры образцов на определенном уровне достигается путем подачи к последним низковольтного электрического тока большой силы. Для измерения температуры образца в нем просверлены сквозные отверстия диаметром 4 мм, в которые вводится термопара. Провода термопары при помощи коллектор-



Фиг. 2. Схема опытной установки



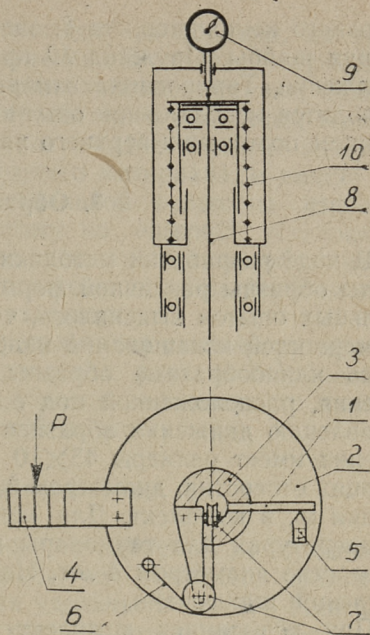
ных колец и щеток 12 выводятся к автоматическому потенциометру ЩУ-12.

Чтобы во время проведения опытов сохранить абразивные свойства сыпучего материала, к корпусу державки и измерительного устройства прочно прикреплены направляющие лопатки, перемешивающие сыпучий материал.

В целях измерения действующего на образец давления сыпучего абразивного материала опытная установка снабжена измерительным устройством, которым определяется величина крутящего момента, действующего на комплект образцов.

Измерительное устройство (фиг. 3) жестко прикреплено к концу пустотелого вала опытной установки и состоит из двух частей: датчика и измерительной головки. Датчик прикреплен к нижнему торцу вала, измерительная головка — к верхнему. К валу датчика жестко прикреплена пружина 1. Шайба 2 может в определенных пределах свободно вращаться вокруг вала 3. К шайбе 2 жестко прикреплен комплект образцов 4, упор 5 и один конец троса 6. Через колеса блоков 7 и пустотелый вал трос направляется к измерительной головке и прикрепляется к стержню 8.

Во время движения образцов в абразивной сыпучей массе от действующих на образец усилий шайба поворачивается и при помощи упора действует на пружину, деформируя ее. Деформация пружины и величина поворота шайбы пропорциональны давлению на комплект образцов. Индикатор 9 измеряет величину перемещения



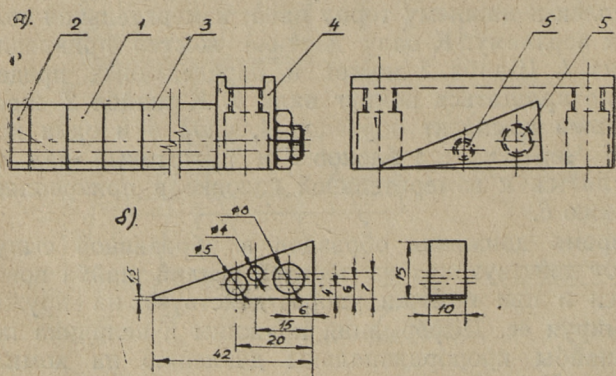
Фиг. 3. Схема измерительного устройства

верхнего конца стержня 8, зависящую от угла поворачивания шайбы. Пружина 10 придает тросу требуемое напряжение. Тарирование измерительного устройства производится неподвижной опытной установкой, при определенном положении верхнего вала.

### 3. Образцы

В ходе разработки методики исследования были испытаны образцы различной формы. В результате предварительных опытов выяснилось, что для исследования закономерностей изнашивания наиболее приемлемыми оказались клинообразные образцы с плоской поверхностью трения, расположенной под определенным углом по направлению движения абразива (фиг. 4, а). Поверхность трения имеет размеры  $45 \times 10$  мм. Просверленные в образцах отверстия, диаметром 8 и 5 мм, служат для соединения их в комплект. Для испытаний при повышенных температурах для термопары в образцах предусмотрено отверстие диаметром 4 мм. Наружная поверхность всех образцов шлифована.

При испытаниях комплект образцов закрепляется в державке или в измерительном устройстве. Комплект состоит из трех образцов 1, трех пластин 2, 3, 4 — торцевой, промежуточной и упорной и соединительных стержней 5 с гайками. Применение разных упорных пластин дает возможность ориентировать поверхность трения образцов под требуемыми углами. Укомплектование дает



Фиг. 4. Комплект применяемых для опытов образцов



возможность одновременно испытывать образцы, на которые действуют разные давления. В целях получения сравнимых результатов при повторных испытаниях, одновременно с изучаемым испытывается и эталонный материал, который необходим для количественной оценки истирающей способности сыпучего материала, и вместе с тем, для определения относительной величины износа исследуемых образцов. Поэтому на опытной установке одновременно испытываются два комплекта образцов. Один состоит из образцов, изготовленных из изучаемого материала, а другой — из эталонного.

Во избежание искажений результатов опытов при одновременном испытании материалов с различной износостойкостью передняя грань образца защищена от изнашивания тонкой узкой полоской из жести.

#### 4. Методика испытания

Износостойкость материалов оценивается по средней интенсивности линейного износа, что позволяет сравнивать материалы с различными удельными весами. Линейный износ  $K$  вычисляется исходя из потери веса образца по формуле

$$K = \frac{\Delta G \cdot 1000}{b \cdot h \cdot \gamma \cdot l} \left[ \frac{\text{мк}}{\text{км}} \right], \quad (1)$$

где  $\Delta G$  — потеря веса образца в  $\Gamma\text{к}$ ,

$b$  — ширина поверхности трения в  $\text{мм}$ ,

$h$  — длина поверхности трения в  $\text{мм}$ ,

$\gamma$  — удельный вес материала в  $\text{г/см}^3$  и

$l$  — длина пути трения в  $\text{м}$ .

Износостойкость разных материалов относительно эталонного материала характеризуется относительной износостойкостью

$$E_i = \frac{K_e}{K_i}, \quad (2)$$

где  $K_e$  обозначает среднюю интенсивность линейного износа материала эталона,  $K_i$  — то же для испытываемого материала.

Потеря веса  $\Delta G$  определяется путем взвешивания образца до и после испытания. Погрешность взвешивания на аналитических весах составляет  $\pm 0,1 \text{ мГ}$ . При точности подсчета  $\pm 5\%$  весовой износ должен быть не ме-

нее 5 мГ. Линейные размеры образца измеряются при помощи микрометра. Удельный вес исследуемого материала определяется экспериментально.

Длину пути трения во время одного определенного опыта можно вычислить по формуле

$$l = \frac{\pi r}{500} (n_{\delta} - n_0) [м], \quad (3)$$

где  $r$  — средний радиус вращения образца в мм,  
 $n_{\delta} - n_0$  — разница числа оборотов барабана и образца в течение опыта.

При этом следует учесть, что общее время опыта делится на три этапа: период пуска, в течение которого установка достигает своей рабочей скорости; установившийся режим, в течение которого скорость постоянна, и выбег, который начинается с выключения электродвигателя и продолжается до полной остановки барабана и образца. Этим вызвана некоторая неточность в расчете средней интенсивности линейного износа, так как во время пуска и выбега плотность абразива изменяется. Величину неточности несколько характеризует коэффициент.

$$\varepsilon = \frac{l_n + l_m}{l}, \quad (4)$$

где  $l_n + l_m$  — длина пути трения, пройденная образцом во время пуска и выбега;

$l$  — общая длина пути трения, пройденная образцом в течение одного опыта.

Экспериментально установлено, что время пуска и выбега составляет менее 10 секунд. При опыте общей продолжительностью в 10 минут и при скорости вращения барабана приблизительно в 600 об/мин,  $\varepsilon \approx 0,01$ .

Чтобы наиболее точно определить среднюю интенсивность линейного износа, некоторые опыты проводились по следующей методике. В аналогичных условиях было проведено два опыта различной продолжительности и получено соответственно две различных потери веса  $\Delta G_1$  и  $\Delta G_2$ . При этом

$$\left. \begin{aligned} \Delta G_1 &= \Delta Q_1 + \Delta P_1 \\ \Delta G_2 &= \Delta Q_2 + \Delta P_2 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

В вышеприведенных формулах  $\Delta Q$  обозначает потерю веса при переходных режимах,  $\Delta P$  — потерю веса при установившемся режиме. Так как  $\Delta Q_1 = \Delta Q_2$ , то сред-



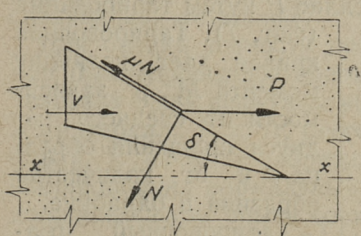
нюю интенсивность линейного износа можно выразить формулой:

$$K = \frac{\Delta G_1 - \Delta G_2}{b \cdot h \cdot \gamma} \cdot \frac{1000}{l_1 - l_2} \text{ [мк/км]}.$$

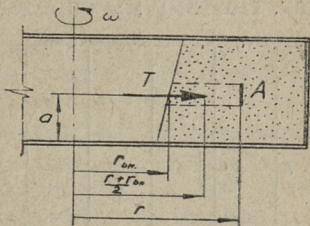
В результате проведенных опытов выяснилось, что неточность, если пренебречь переходными режимами, не превышает 5%.

Большое влияние на интенсивность изнашивания оказывает давление абразивной массы на образец. Поэтому определение усилия, действующего на образец, имеет особое значение при исследовании закономерностей изнашивания.

Клиновидные образцы для определения действующего на них усилия закрепляются в державке так, чтобы при установившемся режиме движения нижняя и задняя плоскости образца не соприкасались с абразивным материалом. В этом случае величина усилий, действующих на



Фиг. 5. Схема действующих на образец сил



Фиг. 6. Схема определения действующих центробежных сил

образец, может быть определена по известной формуле акад. В. П. Горячкина [7]. На клин (фиг. 5) со стороны абразивной массы действуют нормальная сила  $N$ , сила трения  $\mu N$  и параллельно по оси  $x-x$  проекция равнодействующей силы

$$P = N(\sin \delta + \mu \cos \delta), \quad (7)$$

где  $\mu$  обозначает коэффициент трения абразивного материала по металлу и  $\delta$  — угол между направлением движения и наклонной поверхностью клина. Такое соотношение сил имеет место при остром клине, что и соответствует условиям опыта.

Так как для уплотнения находящегося в барабане сыпучего материала применяется центробежная сила, то плотность его в данной точке зависит от радиуса вращения. Центробежная сила, действующая на площадь  $A$  в соответствии с фиг. 6, равна

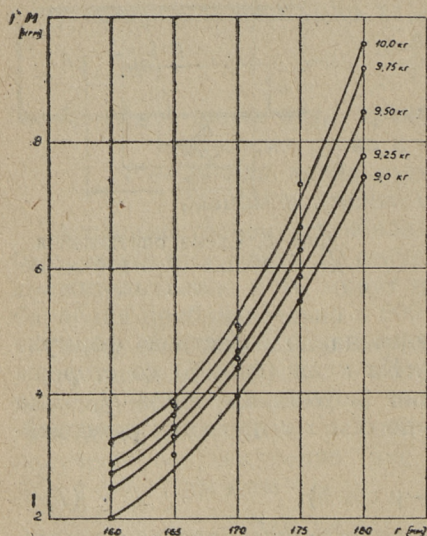
$$T = m \frac{r + r_{вн}}{2} \omega^2, \quad (8)$$

где  $m$  обозначает массу сыпучего материала, действующую на поверхность  $A$ . Так как  $m = K (r - r_{вн})$ , то

$$T = K (r - r_{вн}) \frac{r + r_{вн}}{2} \omega^2 = Br^2 - C. \quad (9)$$

При постоянной угловой скорости  $\omega$  коэффициенты  $B$  и  $C$  будут постоянными.

Однако формулу 9 невозможно применять для расчета действующего на образец усилия  $P$ , так как, кроме центробежной силы, оно зависит еще и от величины и формы абразивного зерна, что, однако, трудно учесть при расчетах. Поэтому мы определяли усилие  $P$  путем тарирования



Фиг 7. Тарировочный график для определения действующего на образец момента в зависимости от количества абразива в барабане

(фиг. 7). Тарировочная кривая дает величину момента  $M$  в зависимости от среднего радиуса вращения образца  $r$  и от количества абразива в барабане.

Тарировочный график был получен следующим образом: вначале была определена величина крутящего момента  $M_0$ , действующего на полный комплект образцов. Затем из комплекта извлечен образец № 1 и определена величина крутящего момента  $M_1$ , действующего на комплект без образца № 1. Момент, действующий на образец № 1, следовательно, равен



$$M_1 = M_0 - M^1 \quad (10)$$

и действующая на образец № 1 сила

$$P_1 = \frac{M_0 - M^1}{r_1}, \quad (11)$$

где  $r_1$  — средний радиус вращения образца № 1.

Аналогично определяются и силы, действующие на остальные образцы.

Нормальное давление  $p$  на образец выражается по формуле

$$p = \frac{N}{F} [\text{кг/см}^2], \quad (12)$$

где  $F$  обозначает фронтальную поверхность образца. Заменяя из формул 7 и 11 полученными величинами, имеем

$$p = \frac{M_0 - M^1}{r \cdot b \cdot h (\sin \delta + \mu \cos \delta)} [\text{кг/см}^2]. \quad (13)$$

Коэффициент трения  $\mu$  между абразивом и металлом определяется для каждого абразива экспериментально на специальной установке.

Для оценки точности применяемого метода исследования были проведены специальные опыты. В идентичных условиях были испытаны четыре образца из одного и того же материала (Ст. 3). Всего было проведено 32 отдельных опыта. В качестве абразивного материала применялся электрокорунд нормальный Э91 с зернистостью 100. Продолжительность опыта составила 10 минут, в течение которых пройденный образцом путь составил примерно 220 метров. Действующее на образец удельное давление было  $4,4 \text{ кг/см}^2$ .

В результате этих опытов выяснили, что среднеарифметическое значение износа равно  $17,75 \text{ мг}$ . При этом среднеквадратичное отклонение результатов опытов  $\sigma = \pm 1,15 \text{ мг}$ , максимальное отклонение от арифметической средней  $\alpha = 1,43$  и относительное отклонение  $\varphi = 6,5\%$ .

## 5. Некоторые результаты опытов

Одна серия опытов проводилась с целью определения истирающих свойств сыпучих абразивных материалов, находящихся в узлах сланцеперегонных установок с твердым теплоносителем. Испытанию подвергались полукокс,

твёрдый теплоноситель и сухой сланец (см. табл. 1). Абразивные свойства этих сыпучих материалов сравнивались с эталонным абразивным материалом, в качестве которого применялся нормальный песок для испытания цементов завода нормального песка Вольского цементного комбината. Песок соответствовал требованиям ОСТ 6239-52. Ниже приводим паспортные данные применяемых партий песка:

содержание  $SiO_2 > 99\%$ ;

содержание глинистых, илистых и пылевидных примесей  $0,2\%$ ;

прошло через сито с сеткой № 50  $\sim 2,5\%$ ;

остаток на сите с сеткой № 85  $\sim 0,5\%$ .

Для проведения указанных опытов применялись образцы из стали 45.

Критерием абразивности служило отношение изнашивающего действия исследуемого и эталонного абразивного материала

$$a = \frac{K_u}{K_e},$$

где  $K_u$  — износ от действия исследуемого абразива и  
 $K_e$  — износ от действия нормального песка.

Для оценки стойкости абразива износ определялся двумя путями трения — 100 м и 1000 м.

Стойкость абразива  $c$  определялась, исходя из отношения

$$c = \frac{K_{100}}{K_{1000}},$$

где  $K_{100}$  — удельный износ образца при пути трения 100 м  
и

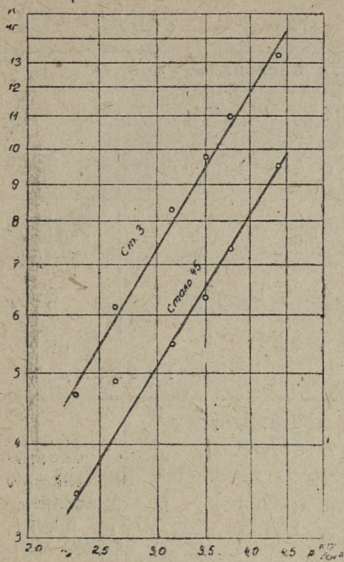
$K_{1000}$  — то же при пути трения 1000 м.

Результаты проведенных опытов собраны в табл. 2.

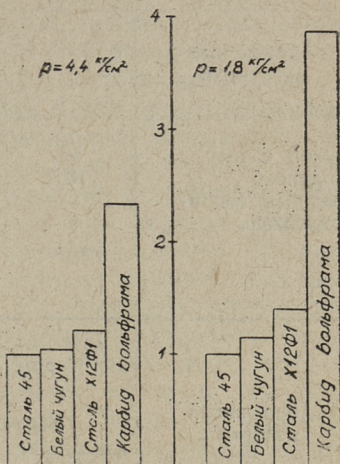
Для предварительной оценки закономерностей изнашивания в сыпучем абразивном материале были проведены опыты для определения зависимости между интенсивностью износа и удельным давлением, действующим на изнашиваемую поверхность.

В виде примера приведены результаты опытов, при которых в качестве сыпучего абразивного материала применялся электрокорунд нормальный Э91 с зернистостью





Фиг. 8. Зависимость износа Ст. 45 и Ст. 3 от давления абразива на образец



Фиг. 9. Диаграмма износостойкости материалов в зависимости от давления абразива на образец

100. Интенсивность изнашивания определялась на образцах, изготовленных из стали Ст. 3 и 45. Действующее на образец удельное давление изменялось в диапазоне от 2 до 4,5 кг/см<sup>2</sup>. Результаты опытов приведены на фиг. 8 в логарифмическом масштабе. Полученные результаты показывают, что искомую зависимость можно приблизительно выразить эмпирической формулой

$$k = C p^m,$$

где  $k$  обозначает среднюю интенсивность линейного износа в  $\mu\text{к}/\text{км}$ ;

$C$  — коэффициент пропорциональности;

$p$  — удельное давление на образец в  $\text{кг}/\text{см}^2$  и

$m$  — показатель степени.

По сравнению с опытами, проведенными с фиксированными абразивами (шлифовальные круги, наждачная бумага), где  $m = 1$  [1], показатель степени  $m$  при движении образца в свободном абразиве значительно больше.

Таблица 1

Зерновой состав абразивных материалов, в %				
Абразивные материалы	Размер зерна, в мм			
	> 1,00	1,00 ... 0,25	0,25 ... 0,063	< 0,063
Сухой сланец	50	20	19	11
Полукок	18,5	28	45	8,5
Твердый теплоноситель	4	26	50	20

Таблица 2

Абразивный материал	Относительная абразивность при $p = 3 \text{ кг/см}^2$		Стойкость абразивного действия на пути 1000 м.
	Длина пути трения		
	100 м	1000 м	
Песок	1,0	1,0	0,9
Сухой сланец	0,068	0,038	0,55
Полукок	0,107	0,052	0,44
Твердый теплоноситель	0,104	0,043	0,36

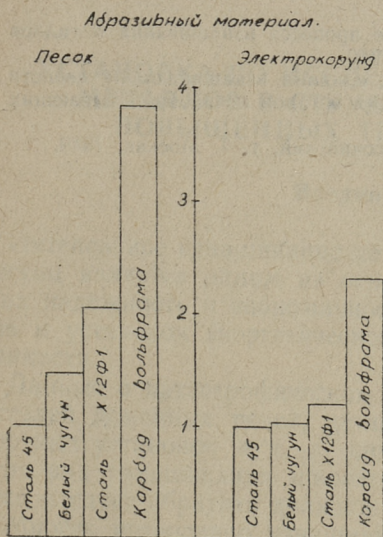
Как видно из фиг. 8, для сталей Ст. 3 и 45  $m \approx 1,6$ . Коэффициент  $C$  для стали Ст. 3 примерно на 25% больше, чем для стали 45.

На фиг. 9 приведены результаты опытов, которые проводились для оценки относительной износостойкости некоторых материалов и наплавов: сталь 45 (эталон), белый чугун, сталь Х12Ф1 и наплавленный карбид вольфрама. В качестве абразивного материала применялся электрокорунд нормальный Э91 с зернистостью 100. Опыты проводились при удельных давлениях 4,4 и 1,8  $\text{кг/см}^2$ . Как явствует из диаграммы, наиболее износостойким является слой карбида вольфрама, затем следуют сталь Х12Ф1, белый чугун и сталь 45. При этом необходимо отметить, что износостойкость наплавленного слоя карбида вольфрама увеличивается при понижении удельного давления значительно больше, чем у стали 45, т. е. вели-



чина показателя степени  $m$  для наплавки карбида вольфрама будет меньше, чем стали 45.

В опытах, которые были проведены для сравнения изнашивающего действия некоторых сыпучих материалов, применялся нормальный песок и электрокорунд нормальный. Образцы были изготовлены из следующих материалов: сталь 45, белый чугун, сталь Х12Ф1 и наплавленный на сталь Ст. 3 слой карбида вольфрама. В качестве эталонного материала применялась сталь 45. На фиг. 10 показаны результаты этих опытов, причем износостойкость стали 45 принята за единицу. Как видно, наиболее яркое различие в износостойкости материалов этой группы имеет место в тех случаях, когда в качестве абразива применялся песок.



Фиг. 10. Диаграмма износостойкости при разных абразивных материалах

казаны результаты этих опытов, причем износостойкость стали 45 принята за единицу. Как видно, наиболее яркое различие в износостойкости материалов этой группы имеет место в тех случаях, когда в качестве абразива применялся песок. Что касается абсолютного износа, то износ стали 45 будет примерно в 3 раза меньше, чем при применении в качестве абразива электрокорунда. На основе этих опытов можно сделать вывод, что в случае использования песка как абразивного материала, большое значение для повышения износостойкости деталей машин имеет правильный выбор их материала.

В настоящей работе отмечаются исходные направления по выбору износостойких материалов. Дальнейшие работы имеют целью более подробное решение этих вопросов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. М. М. Хрущов и М. А. Бабичев. Исследования изнашивания металлов. Москва, 1960.
2. K. Wellinger, H. Uetz. Gleitverschleiss, Spülverschleiss, Strahlverschleiss unter der Wirkung von körnigen Stoffen. VDI — Forschungsheft 449, 1955.
3. А. А. Сороко-Новицкая. Исследование влияния состава, твердости и структуры углеродистых сталей на их сопротивление абразивному изнашиванию. Москва, 1959.
4. Л. С. Ермолов. Исследование изнашивания режущих органов почвообрабатывающих машин на различных почвах. Харьков, 1960.
5. И. В. Южаков. Исследование процесса изнашивания металлов при трении о грунт. Харьков, 1960.
6. Г. П. Каплун. Исследование влияния изнашивающих свойств на долговечность деталей рабочих органов почвообрабатывающих машин. Минск, 1961.
7. В. П. Горячкин. Собрание сочинений, т. 7. Москва, 1949.



У. Суур

## УСТАНОВКА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ИЗНОСА МЕТАЛЛОВ В СТРУЕ АБРАЗИВА ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

### Введение

Интенсивное изнашивание деталей в потоке абразивных частиц является одним из основных факторов, снижающих надежность и экономичность работы многих агрегатов и установок энергетической и химической промышленности.

Данные о катастрофическом износе отдельных узлов и деталей доменных печей, дезинтеграторов, пневмотранспортных установок и т. д. свидетельствуют о том, что этот вид изнашивания широко распространен и что на него следует обратить должное внимание.

Многие интенсивно изнашивающие детали и узлы машин и установок работают при повышенной температуре. До сего времени опубликовано мало работ [1, 2], трактующих о влиянии температуры на интенсивность изнашивания в струе абразива. При исследовании износа узлов и деталей той или иной машины или установки режим испытания на износ обычно выбирается близкий к реальным условиям работы данной машины. В таких условиях трудно проследить, как влияют на износ отдельные факторы. Исследования в этой области затруднены еще и тем, что до сего времени не существует определенного общепринятого мнения о сущности данного вида изнашивания; представления отдельных авторов о механизме изнашивания различны. Кроме того отсутствует стандартная методика определения износостойкости материалов в абразивной струе.

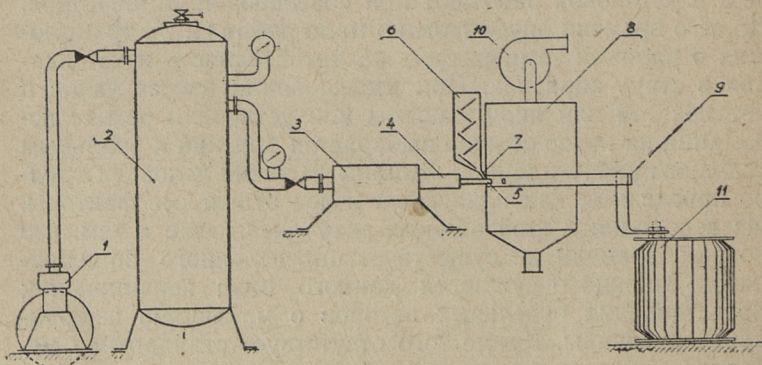
В настоящей работе дается описание установки, а также методики исследования изнашивания в абразивной струе при повышенных температурах. В ней изложены также некоторые предварительные результаты опытов.

Опытная установка создана с таким расчетом, чтобы на ней можно было исследовать, как влияют на интенсивность изнашивания следующие факторы: скорость абразивных частиц, величина и форма зерна и угол атаки в условиях повышенных температур. Это позволяет уточнить зависимость между интенсивностью изнашивания и параметрами износа и помогает выяснить механизм износа металлов в струе абразива при повышенных температурах.

### Опытная установка

Схема опытной установки представлена на фиг. 1. Холодный воздух от поршневого компрессора 1 по трубопроводу поступает в резервуар 2, из которого по трубопроводам направляется в специальный электронагреватель 3. Электронагреватель 3 представляет собой трехсекционную шамотную батарею. Каждая секция снабжена цилиндрическими отверстиями, в которых помещены нагревательные спирали. Проходящий через электронагреватель воздух может быть нагрет до температуры 900°C. Далее горячий воздух по трубе 4 поступает к соплу 5.

Используемый при испытании абразив нагревается в печи 6. Эта электропечь состоит из отдельных нагрева-



Фиг. 1. Схема опытной установки



тельных элементов, расположенных друг к другу под углом. Подаваемый сверху в электропечь абразив стекает с одного нагревательного элемента на другой, в результате чего может быть нагрет до температуры 900°.

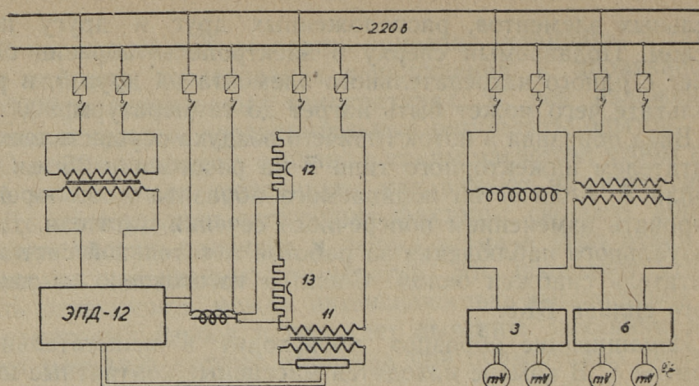
Ввод абразива в поток горячего воздуха осуществляется питателем инжекторного типа 7 на расстоянии 35 мм от сопла 5. Количество подаваемого абразива можно регулировать изменением поперечного сечения питателя. Для визуального наблюдения за работой питательной системы питатель снабжен окном. Сопло 5 изготовлено из твердого сплава ВК8.

Изнашивание образцов происходит в испытательной камере 8. В камере находятся массивные контактные шины 9, на которых закреплены держатели образца. Нижняя часть камеры имеет коническую форму и исполняет функции сборника абразива. Для удаления отработанного абразива в днище конической части сборника имеется отверстие. Откидывающаяся передняя стенка испытательной камеры снабжена смотровым окном. В верхней части камеры помещается отсасывающая труба вентилятора 10, через которую удаляется запыленный воздух. Производительность вентилятора выбрана такой, чтобы в камере сохранялось атмосферное давление, так как повышение или понижение давления может влиять на скорость и направление абразивной струи.

Подогрев образца до нужной температуры осуществляется специальным трансформатором 11 ( $U = 2 \div 6$  в,  $I \leq 1200$  а). Клеммы трансформатора соединены с контактными шинами, к которым прикреплены держатели образцов. Расстояние держателей от сопла регулируемое. Вращающиеся держатели обеспечивают изменение угла атаки между абразивной струей и поверхностью образца.

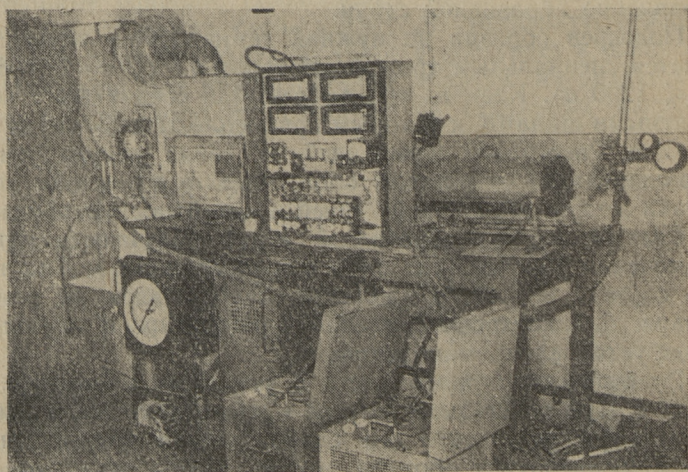
Разные скорости абразивной струи получаются путем изменения рабочего давления в воздухопроводе. Для этого служит регулятор давления, находящийся на резервуаре. Для контроля давления в резервуаре и трубопроводе установлены манометры.

Электрическая схема опытной установки приведена на фиг. 2. При контактном нагреве тепло образуется в самом образце в результате его сопротивления прохождению тока. Температуру образца можно практически довести до температуры плавления. Для грубого регулирования температуры образца пользуются реостатами 12 и 13 на



Фиг. 2. Электрическая схема опытной установки

первичной цепи трансформатора 11. Поддержание заданной температуры образца и ее регистрация осуществлялись автоматическим потенциометром ЭПД-12. Для контроля температурного режима установки в воздухо- и абразивонагревательной печах установлены термопары. Контрольно-измерительные приборы находятся на щите управления. На фиг. 3 приведен фотоснимок опытной установки.

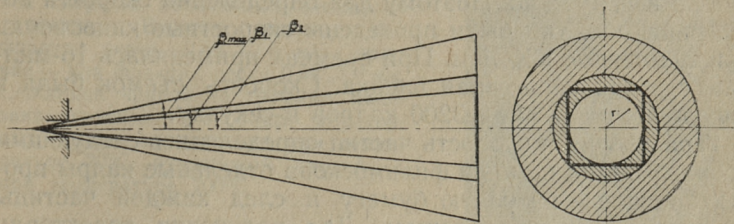


Фиг. 3. Общий вид опытной установки



Известно, что выходящая из сопла газовая струя расширяется. В зависимости от расширения абразивной струи угол атаки между абразивной струей и поверхностью образца не остается постоянным по всей изнашиваемой поверхности. Движущиеся вместе с воздухом абразивные частицы встречают образец под углом атаки, зависящим от расстояния точки падения  $r$  от оси абразивной струи. Поэтому приходится оперировать некоторой средней величиной, считая угол атаки равным величине так называемого номинального угла атаки, который соответствует углу атаки на оси струи.

Для выяснения влияния концентрации тяжелой примеси на формирование струи и для подбора подходящих размеров образца и его расстояния от сопла было проведено экспериментальное определение расширения струи для данной установки (фиг. 4).



Фиг. 4. Схема расширения струи опытной установки

На основании проведенных опытов установлено, что при выбранных масштабах максимальное отклонение угла атаки от номинального у вершины образца не превышает  $6^\circ$ .

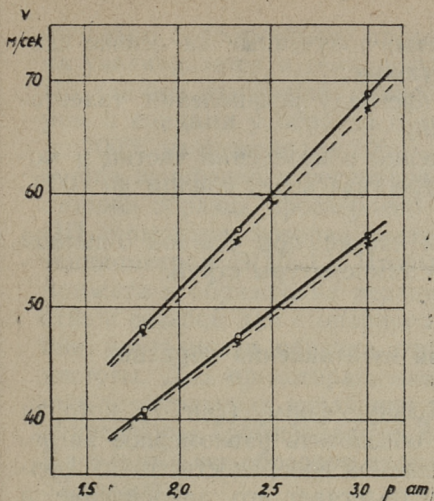
Теоретическое определение скорости абразивных частиц в струе воздуха весьма сложно. В конкретном случае теоретическое определение скорости абразивных частиц усложняется еще тем, что на опытной установке мы имеем дело с горячей двухфазной струей, движущейся в холодном воздухе. Скорость струи изменяется в зависимости от ее температуры и температуры окружающего воздуха. При распространении струи в более холодной среде ядро постоянной скорости укорачивается, следовательно,

уменьшается и скорость абразивных частиц. При наличии примеси падение осевой скорости в струе зависит от начальной концентрации примеси и от соотношения начальных скоростей примеси и воздуха. Начальная скорость по-разному влияет на затухание скорости струи. В случае, когда примесь не имеет начальной скорости, струя затрачивает энергию на вовлечение ее в движение и затухание скорости происходит быстрее, чем в струе свободной от примеси. Если примесь выбрасывается из сопла с начальной скоростью, равной скорости струи, то импульс струи увеличивается за счет импульса примеси и затухание скорости происходит медленнее, чем в струе свободной от примеси. Начальная скорость абразивных частиц на опытной установке отстает от начальной скорости струи воздуха вследствие относительно короткого пути ускорения и значительного веса частиц.

Все вышесказанное подтверждает, что точное определение скорости абразивных частиц расчетным путем практически невозможно. Поэтому для определения скорости абразивных частиц были проведены скоростные киносъемки кинокамерной СКС1 м. При съемках применялась 16-миллиметровая негативная пленка. Скорость съемок была в пределах от 1800 до 3200 кадров в секунду.

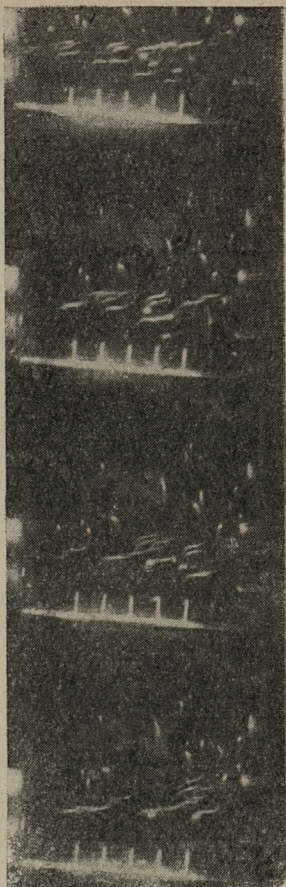
Траектория и скорость частиц определялись следующим образом. При помощи фильмоскопа отдельные кадры проектировались на белую бумагу и след каждой частицы фиксировался карандашом. Для получения траектории частицы следы отдельных кадров соединялись и скорость частицы определялась делением пути, пройденного частицей между двумя кадрами, на соответствующее время. Время определялось по отметкам, оставленным на краю пленки неоновой лампочкой. Съемки были проведены при разных температурах и давлениях и с разными фракциями абразива. Построенные на основе полученных результатов кривые показывают зависимость средней скорости частиц от давления (каждая кривая дана при определенной температуре). Примеры полученных кривых приведены на фиг. 5. Как показывают кадры скоростной киносъемки, различные частицы абразива имеют разную скорость. Поэтому в дальнейшем скорость струи считалась равной некоторой средней величине. В определенном поперечном сечении струи скорость частиц, движущихся вблизи пограничного слоя, отстает от скорости частиц, движущихся





Фиг. 5 (сверху). Зависимость средней скорости абразивных частиц от давления. Верхние кривые для фракции песка 0,40...0,63 мм, нижние — для фракции песка 0,63...1,0 мм. Сплошной кривой на графике показана зависимость скорости абразивных частиц от давления при температуре 20°C, пунктирной кривой — при температуре 700°C

Фиг. 6 (справа). Серия из четырех кадров киносъемок. На левом краю кадра виден конец сопла, на правом краю — держатели, между которыми находится образец. Белые штрихи на черном фоне изображают следы движущихся частиц, белые точки — находящиеся на бархате частицы песка. Под движущимися частицами видна масштабная линейка.



вблизи оси струи. С целью выравнивания поля скоростей при опытах, изнашиваемая поверхность образца взята меньше поперечной площади струи (см. квадрат на фиг. 4). Максимальные отклонения скорости частиц от среднего значения при использовании отфракционированного песка могут достигать 30%.

На фиг. 6 приведена короткая серия полученных кад-

ров. Важнейшие результаты, полученные на основе скоростных киносъемок, следующие:

1) до удара частиц о преграду искривления траектории полета не наблюдается;

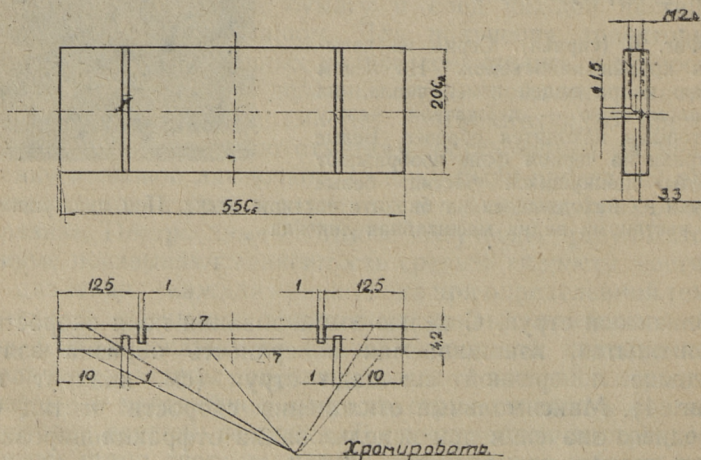
2) существенных изменений в поведении частиц в момент удара при температуре газа перед соплом до  $700^{\circ}\text{C}$  замечено не было;

3) скорость абразивных частиц при данной опытной установке мало зависит от температуры струи.

### Форма и технология изготовления образцов

Образец имеет прямоугольную форму (фиг. 7), которая выбрана для того, чтобы обеспечить равномерное нагревание его по всей изнашиваемой поверхности; такая форма образца одновременно облегчает его закрепление в держателях. Величина рабочей поверхности образца  $20 \times 20$  мм.

Латунные держатели интенсивно охлаждают концы образца. Для выравнивания температуры образец снабжен прорезями, находящимися на одинаковом расстоянии от его концов. Размеры и число, а также расстояния этих прорезей определены экспериментально. Благодаря этим



Фиг. 7. Образец, применяемый при изнашивании в струе абразива



прорезям сопротивление прохождению электрического тока увеличивается и температура на концах повышается. По данным измерений разность температур между центром и концами у образца с прорезями при температурах до 700°C не превышала 20°.

Для измерения и регулирования температуры в задней стороне образца просверлено отверстие, куда вводится ПП термопара, которая соединена с автоматическим потенциометром ЭПД-12. Чтобы термопара была плотно прижата к образцу, на верхней его части имеется отверстие с резьбой для стопорного винта. Фронтальная и задняя поверхности образца отшлифованы до 7-го класса чистоты. Для предотвращения окисления при повышенных температурах нерабочие поверхности образцов были подвергнуты хромированию. Все образцы маркировались. Начальный вес образцов из углеродистой стали был около 32 граммов.

### Используемый абразив и его свойства

При исследовании механизма воздействия частиц на поверхность преграды установлено, что эффект разрушения поверхности зависит от положения частицы абразива в момент удара и от направления ее движения. Конечный эффект разрушения зависит от свойств и особенностей строения самой частицы. Немалую роль здесь играют размеры, структура, форма и прочность частиц абразива. При повышении температуры некоторые из этих характеристик изменяются.

В качестве абразива использовался однородный по зерновому, химическому и минералогическому составу кварцевый песок. На опытной установке в качестве абразива применялся нормальный кварцевый песок для испытаний цементов завода нормального песка Вольского цементного комбината. Песок соответствует требованиям ОСТ 6139-52 и содержит кварца 99,5%, а глинистых, илистых и пылевидных примесей около 0,15%. Чтобы получить однородный состав кварцевого песка по его абразивным свойствам для всех опытов, нужное количество песка было разделено на фракции просевом на ситах. Все полученное количество песка одной определенной фракции тщательно перемешивалось. Благодаря высокой огнеупорности чистого кварцевого песка, его абразивные свойства мало за-

висят от температуры в пределах температур испытания. Полученные при различных температурах результаты практически не зависят от температуры песка.

Перед испытаниями песок высушивался. При проведении опытов в основном применялись фракции 0,315... 0,40 мм, 0,40...0,63 мм и 0,63...1,0 мм, причем для получения сравнимых результатов повторно песок не использовался. Изучение частиц песка под микроскопом показало, что зерна свежего песка имеют сравнительно округленную, гладкую поверхность, в то время как зерна уже использованного и снова фракционированного песка имеют свежие острые поверхности разрушения. Проведенные опыты показали, что интенсивность изнашивания при повторном использовании песка увеличивается до 2,5 раз. Повышенную интенсивность изнашивания образцов частицами с острыми краями можно объяснить как повышением режущих свойств этих частиц, так и увеличением скорости потока вследствие уменьшения массы и изменения формы частиц.

### Техника проведения опытов

Для исследования влияния угла атаки на интенсивность изнашивания плоские образцы устанавливались в держателях так, чтобы был обеспечен выбранный угол атаки (в пределах от  $90^\circ$  до  $0^\circ$ ). Держатели были сконструированы таким образом, что их ось совпадала с горизонтальной осью симметрии фронтальной поверхности образца. Тем самым обеспечивалось совпадение центра образца с осью струи. Для установки образца под нужным углом атаки применялась шкала, прикрепленная на неподвижной основе. Точность установки образцов  $1^\circ$ .

Углом атаки  $\alpha$  называется острый угол, заключенный между фронтальной поверхностью образца и направлением скорости абразивных частиц. Испытания на износ проводились в основном при следующих углах атаки:  $\alpha = 25, 30, 45, 65$  и  $90^\circ$ . Для защиты боковых поверхностей (нерабочих поверхностей) образца от первичной струи, а задней поверхности — от рикошетных вторичных частиц, в установке применялись специальные защитные чехлы, оставлявшие открытой только фронтальную рабочую поверхность образца. Число отдельных случайных рикошетов о фронтальную поверхность и скорость их



столь незначительны, что изнашивающий эффект рикошетов по сравнению с первичной струей можно считать ничтожным.

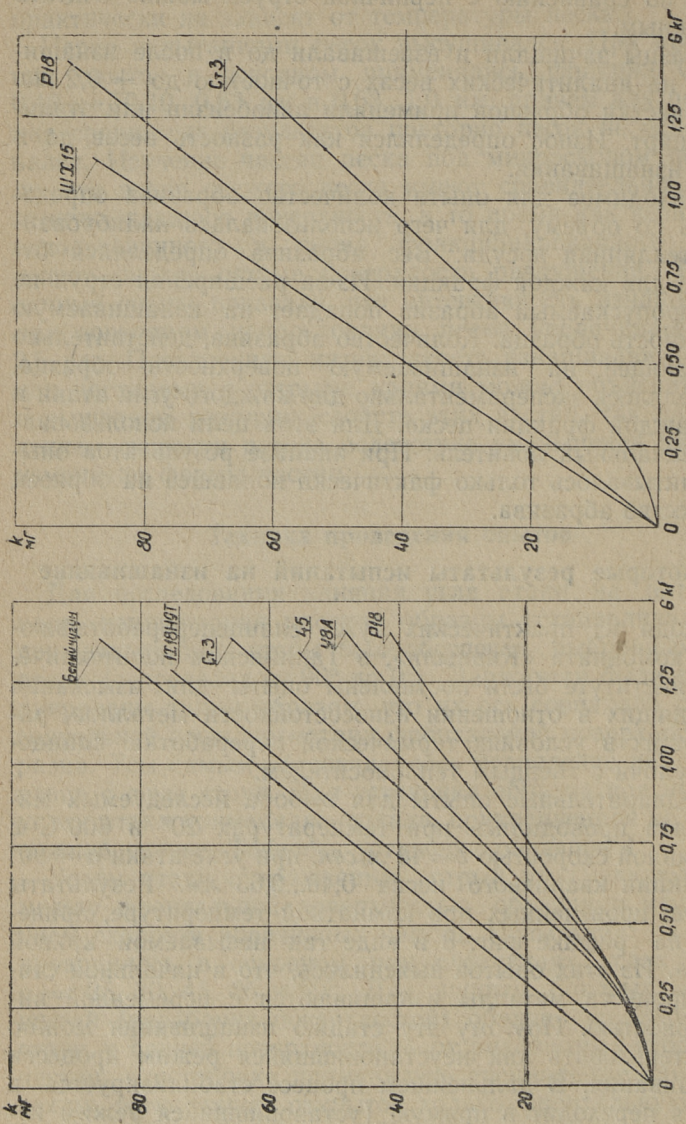
Образцы зачищали и взвешивали до и после изнашивания на аналитических весах с точностью до  $\pm 0,2$  мг. Для очистки образцов применяли авиобензин или этиловый спирт. Износ определялся как разность весов до и после изнашивания.

Необходимое для опыта количество абразива определялось по объему, для чего использовалась калиброванная стеклянная посуда. Вес абразива определялся отдельно для каждой фракции. Из-за расширения струи не весь пропускаемый абразив попадает на изнашиваемую поверхность образца. Количество абразива, действительно попадающее на изнашиваемую поверхность образца, определялось экспериментально для каждого угла атаки и для каждой фракции песка. Для этой цели использовался специальный ловитель. При анализе результатов опытов учитывалось только фактически попавшее на образец количество абразива.

### Некоторые результаты испытаний на изнашивание

Исходя из практических нужд сланцеперерабатывающего комбината «Кивийли», в Таллинском политехническом институте были поставлены опыты для изыскания подходящих в отношении износостойкости металлов, работающих в условиях термической переработки сланцевой мелочи с твердым теплоносителем.

Предварительные опыты для выбора исследуемых материалов проводились при температурах  $20^\circ$  и  $600^\circ\text{C}$  с постоянной скоростью  $v=48$  м/сек, при угле атаки  $\alpha=90^\circ$  и фракции кварцевого песка 0,40...0,63 мм. Результаты опытов, проведенных при комнатной температуре, приведены на графике фиг. 8 в виде так называемой кривой износа. Из этих опытов выяснилось, что в начальной стадии процесса металлы изнашиваются с переменной интенсивностью. Поэтому эту стадию изнашивания можно характеризовать как неустановившийся режим процесса изнашивания. В дальнейшем процесс стабилизируется и кривая переходит в прямую (установившийся режим изнашивания). Период приработки мягких и закаленных сталей протекает по-разному, что соответствует разному

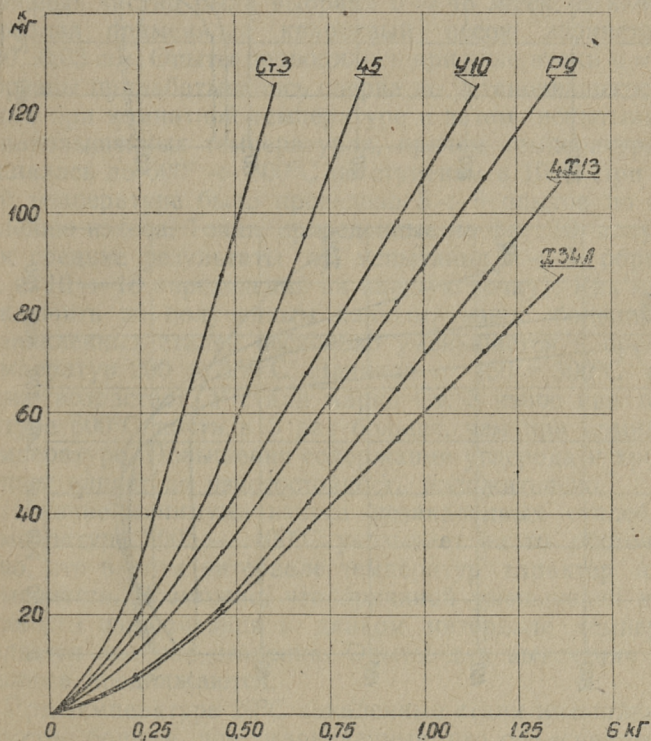


Фиг. 8. Кривые износа незакаленных (левый график) и закаленных сталей (правый график) при температуре 20°C

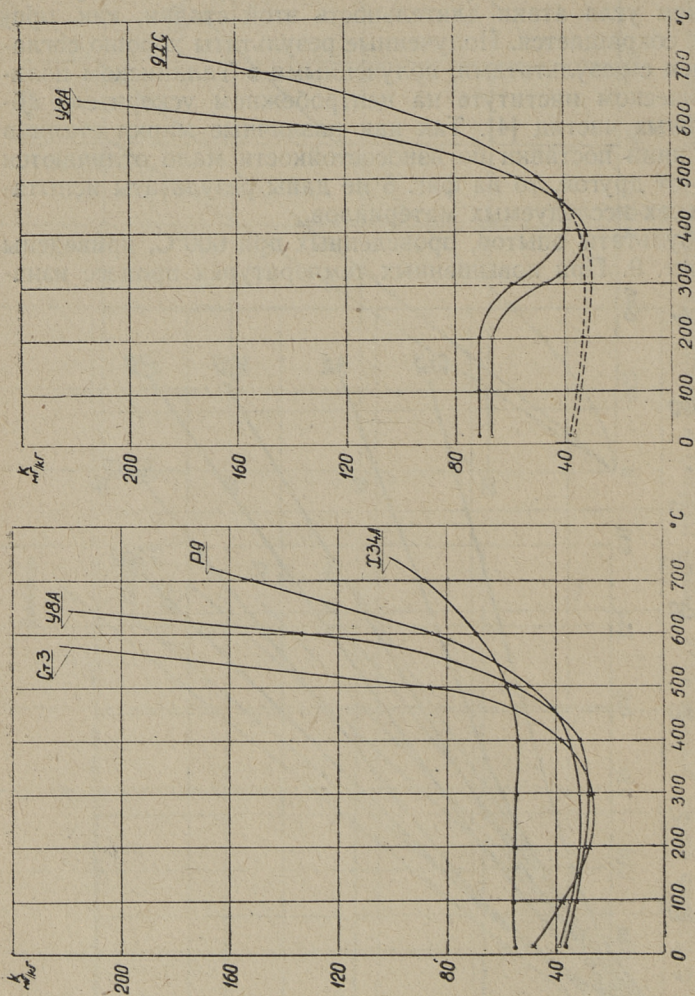


механизму износа этих материалов. Как показывают опыты, длительность первой стадии изнашивания зависит, кроме материала образца, также от скорости и угла атаки абразивной струи. С увеличением скорости и уменьшением угла атаки длительность этой стадии, как правило, сокращается. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами, полученными в Таллинском политехническом институте на центробежном ускорителе абразивных частиц [4]. Так как различные марки стали в состоянии поставки по износостойкости мало отличаются одна от другой, то на фиг. 8 не даны результаты испытания всех исследуемых материалов.

Результаты опытов, проведенных при 600°C, приведены на фиг. 9. При повышенных температурах процесс изна-



Фиг. 9. Кривые износа различных материалов при температуре 600°C



Фиг. 10. Зависимость интенсивности изнашивания от температуры



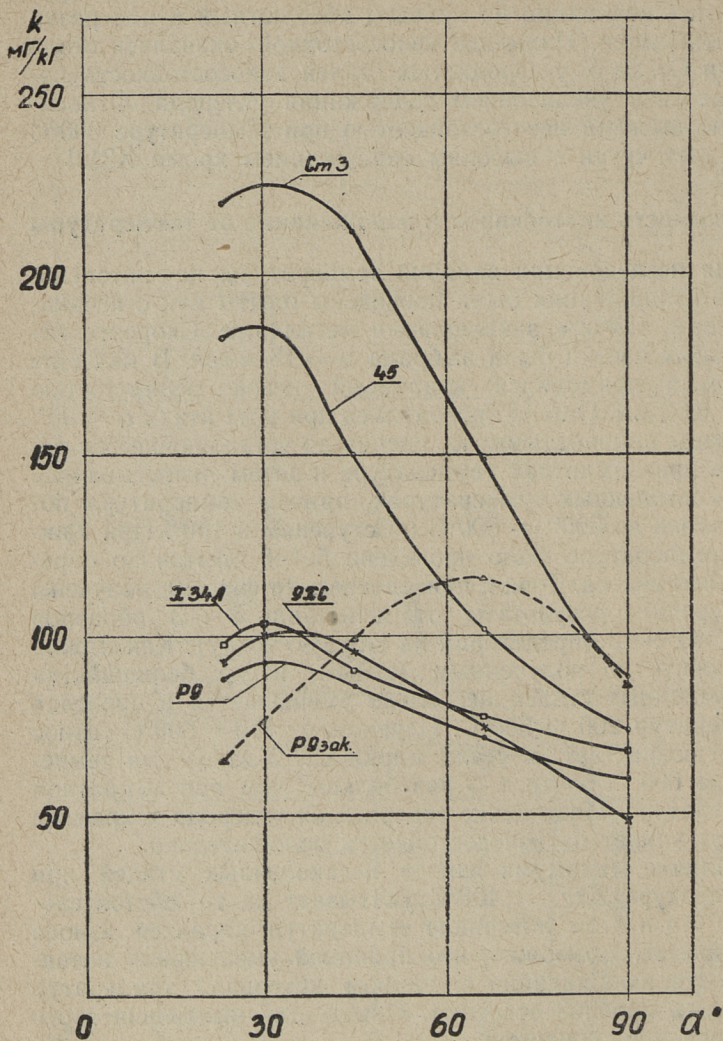
шивания протекает так же, как при комнатной температуре, но, как видно из кривых, абсолютный износ резко увеличивается. Наименее износостойкой оказалась сталь марки Ст. 3. У углеродистых сталей износостойкость повышается с увеличением содержания углерода. Относительно высокой износостойкостью при температуре  $600^{\circ}\text{C}$  обладает чугуны с высоким содержанием хрома Х34Л.

### Зависимость интенсивности изнашивания от температуры

Для исследования влияния температуры на интенсивность изнашивания были проведены опыты как с незакаленными, так и с закаленными металлами. Скорость абразивных частиц была выбрана  $v = 48$  м/сек. В качестве абразива применялся кварцевый песок зернистостью 0,40...0,63 мм. Опыты проводились при угле атаки  $\alpha = 90^{\circ}$ . Образцы прирабатывались сперва до установившегося режима при комнатной температуре и затем испытывались при повышенных температурах, причем температура повышалась до  $600^{\circ} \div 800^{\circ}\text{C}$  по ступеням в  $100^{\circ}$ . При каждой температуре было проведено 5  $\div$  6 опытов по определению износа. Точки, приведенные на фиг. 10, получены как средние результаты от испытания 2  $\div$  3 образцов (т. е. 10  $\div$  18 определений на каждую точку). Как можно заключить по полученным данным, износ большинства незакаленных сталей несколько уменьшается в пределах температур 200  $\div$  350 $^{\circ}\text{C}$ . Начиная с 450  $\div$  500 $^{\circ}\text{C}$  износ резко возрастает. У стали марки Ст. 3 износ при температуре 600 $^{\circ}\text{C}$  почти в 5 раз больше, чем при комнатной температуре. Повышение содержания углерода и хрома в общем влияет на износостойкость положительно.

Наличие минимума износа незакаленных сталей при температуре 200 $^{\circ}$  — 400 $^{\circ}\text{C}$  указывает на то обстоятельство, что в этом интервале температур характер износа изменяется. Возможно, что причиной уменьшения интенсивности изнашивания в данном интервале температур является явление старения. Опыты для выяснения этого вопроса продолжаются.

При температуре 20 $^{\circ}\text{C}$  закаленные стали изнашиваются заметно больше, чем незакаленные, что объясняется разным механизмом износа закаленных и незакаленных сталей при угле атаки  $\alpha = 90^{\circ}$ . Часть результатов, полученных с закаленными сталями, приведена на фиг. 10 (пра-



Фиг. 11. Зависимость интенсивности изнашивания от номинального угла атаки



вый график). Пунктирной кривой на графике показаны кривые износа незакаленных сталей, сплошной кривой — кривые износа закаленной стали. При высокой температуре эффект закалки сталей исчезает и, как видно на графике, кривые износа при температуре  $450^{\circ} - 500^{\circ}\text{C}$  совпадают.

### Зависимость интенсивности изнашивания от угла атаки

Опыты для определения зависимости износостойкости металлов от угла атаки были проведены при температурах  $500^{\circ}$  и  $700^{\circ}\text{C}$ . Скорость абразивной струи равнялась  $v = 48$  м/сек. В качестве абразива применялся кварцевый песок зернистостью 0,40...6,63 мм. Опыты проводились при углах атаки  $\alpha = 25, 30, 45, 65$  и  $90^{\circ}$ . Часть полученных результатов (при температуре  $500^{\circ}\text{C}$ ) приведена на фиг. 11. При температуре  $500^{\circ}\text{C}$  испытывались как закаленные, так и незакаленные материалы.

По полученным результатам установлено, что максимум интенсивности изнашивания для незакаленных сталей находится при угле атаки около  $\alpha = 30^{\circ}$ . Износ легированных сталей в меньшей степени зависит от угла атаки. Особенно существенно влияет угол атаки на износ обыкновенных углеродистых сталей.

Для закаленных сталей максимум интенсивности изнашивания находится при угле атаки около  $\alpha = 70^{\circ}$ . Пунктирной кривой на фиг. 11 приведена кривая износа закаленной стали марки Р9. Характер износа закаленной стали Р9 при  $500^{\circ}\text{C}$  аналогичен характеру износа при комнатной температуре.

Вторая серия опытов, которая была проведена при температуре  $700^{\circ}\text{C}$ , не дала стабильных результатов. Большой разброс результатов опытов объясняется фазовыми превращениями в сталях при этих температурах.

### ЛИТЕРАТУРА

1. К. В. Олесевиц. Износ элементов газовых турбин при работе на твердом топливе. Машгиз, 1959.
2. 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.
3. Н. С. Алферов. Ударная эрозия рабочих лопаток газовой турбины на твердом топливе. Диссертация, Ленинград, 1952.
4. И. Клейс. Об изнашивании металлов в абразивной струе. Автореферат, Таллин, 1959.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ ЗАЕДАНИЯ

### 1. Введение

Заедание является одним из наиболее опасных повреждений рабочих поверхностей зубьев зубчатых колес. Причина этого явления заключается в разрыве масляной пленки в контактной зоне зубьев, вследствие которого возникает металлический контакт и схватывание рабочих поверхностей. В относительном движении зубьев узлы схватывания разрушаются, и вызванные этим повреждения поверхностей могут привести к заеданию.

Вследствие разрушения граничной пленки смазки в условиях граничного трения, в контактной зоне возникает металлический контакт. Исчезновение граничной смазочной пленки может быть обусловлено пластическими деформациями контактирующих поверхностей, высокими местными температурами при трении в контактной зоне или обеими причинами одновременно.

Так как основной тенденцией в развитии современных зубчатых передач является увеличение передаваемых мощностей и скоростей вращения, то опасность возникновения заедания в проектируемых передачах увеличивается. В то же время само явление заедания исследовано недостаточно. Отсутствует также общепринятый метод расчета на заедание, который можно было бы использовать в практике проектирования зубчатых передач.



## 2. Влияние некоторых факторов на заедание зубчатых колес

При зацеплении зубья зубчатых колес перекатываются и одновременно скользят друг по другу. Относительная скорость скольжения профилей  $v_{ck}$ , т. е. относительная скорость точек контактирующих профилей в момент контакта, является переменной величиной и имеет максимальные значения в начальный и конечный моменты зацепления. Скорость скольжения быстроходных зубчатых передач в опасных, с точки зрения заедания, точках зацепления находится в пределах от 3 до 15 м/сек.

Скорость скольжения имеет в основном решающее значение при объяснении явления заедания, так как от нее зависит температурный режим в смазочном слое в месте контакта. Зависимость максимального повышения температуры в контактной зоне от положения точки зацепления изображена на фиг. 1, III. Повышение температуры  $\vartheta_{\text{макс}}$  найдено по формуле Блока [1]. В рассматриваемый момент времени вязкость смазки определяется температурой в месте контакта, которая и влияет на толщину слоя смазки между работающими поверхностями. Другими словами, температура определяет характер трения. Высказано мнение, что в зависимости от сколости скольжения и давления в зубчатых передачах имеет место смешанное трение, т. е. граничное и жидкостное одновременно [2].

Скорость скольжения непосредственно связана с суммарной скоростью качения  $v_c$  контактирующих точек.

$$v_c = v_I + v_{II} = \omega_1 x + \omega_2 (a - x) = \omega_2 [x(i-1) + a],$$

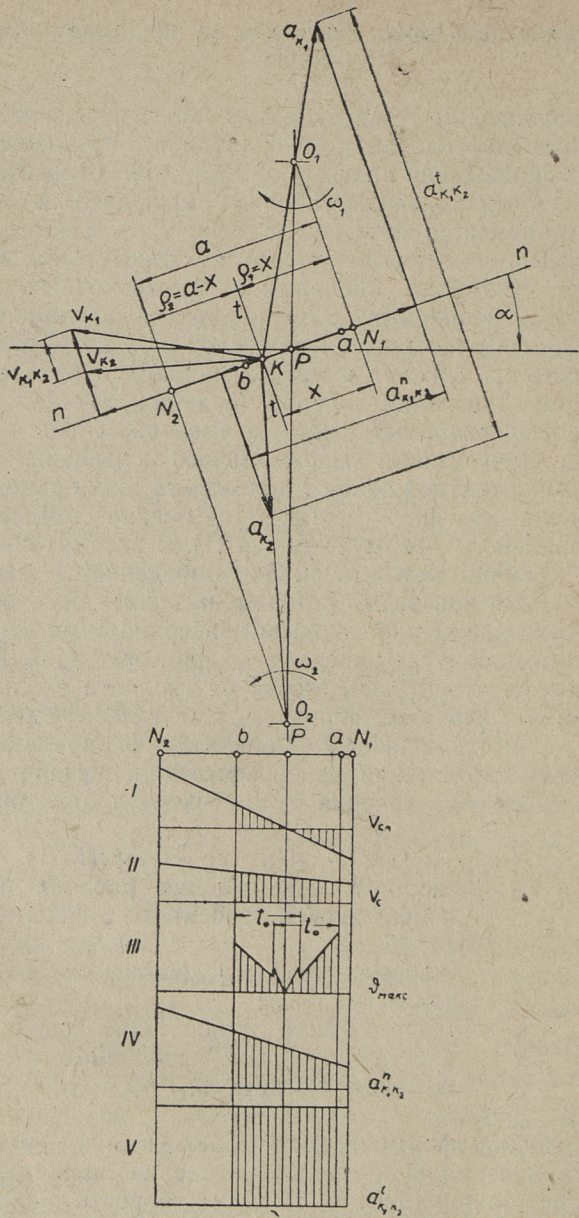
где  $v$  и  $v_{II}$  — скорости перемещения рабочих поверхностей зубьев относительно зоны контакта;

$\omega_1$  и  $\omega_2$  — угловые скорости вращения зубчатых колес ( $\omega_1 > \omega_2$ );

$a$  — теоретическая длина линии зацепления;

$x$  — расстояние точки зацепления от точки  $N_1$  (фиг. 1); при этом  $0 \leq x \leq a$ .

Приведенная формула показывает, что и суммарная скорость качения в процессе зацепления является переменной величиной (фиг. 1, II). Сама скорость скольжения  $v_{ck}$  равна разности скоростей  $v_I$  и  $v_{II}$ :



Фиг. 1.



$$v_{ck} = v_I - v_{II}.$$

Влияние суммарной скорости на заедание противоположно влиянию скорости скольжения. Значение скорости скольжения для явления заедания определялось как при помощи зубчатых колес, так и при помощи цилиндрических роликов. В последнем случае опыты проводились при постоянных скоростях скольжения, которые соответствовали бы скоростям в одной конкретной точке рабочей поверхности зуба. При постоянной скорости скольжения вышеупомянутый смешанный режим трения не имеет места.

Так как скорость скольжения является переменной величиной, то между контактирующими точками профилей имеется некоторое относительное ускорение. На это обстоятельство впервые указывал проф. В. А. Гавриленко [3], поднимая этим вопрос о возможном влиянии относительного ускорения на повреждение рабочих поверхностей зубьев.

Относительное ускорение  $a_{k_1 k_2}$  между точками  $K_1$  и  $K_2$  профилей, соприкасающихся в контактной точке  $K$ , можно рассматривать как сумму слагающих, одна из которых —  $a_{k_1 k_2}^t$  — направлена по общей касательной  $t-t$ , другая —  $a_{k_1 k_2}^n$  — по нормали  $n-n$  (см. фиг. 1).

$$\vec{a}_{k_1 k_2} = \vec{a}_{k_1 k_2}^t + \vec{a}_{k_1 k_2}^n.$$

Относительное нормальное ускорение при внешнем зацеплении определяется формулой

$$a_{k_1 k_2}^n = x (\omega_1^2 - \omega_2^2) + a \omega_2^2 = \omega_2^2 [x (i^2 - 1) + a],$$

а относительное тангенциальное ускорение — формулой

$$a_{k_1 k_2}^t = \omega_2^2 r_{o2} (i + 1).$$

Здесь

$r_{o2}$  — радиус основной окружности колеса;

$i = \frac{\omega_1}{\omega_2}$  — передаточное число зацепления.

Относительное нормальное ускорение всегда оказывается положительным (т. е. неизменным по направлению) и в пределах линии зацепления меняется линейно. Оно приобретает свое максимальное значение в конечной точке линии зацепления (фиг. 1, IV).

Относительное тангенциальное ускорение оказывается за все время зацепления постоянной величиной (фиг. 1, V),

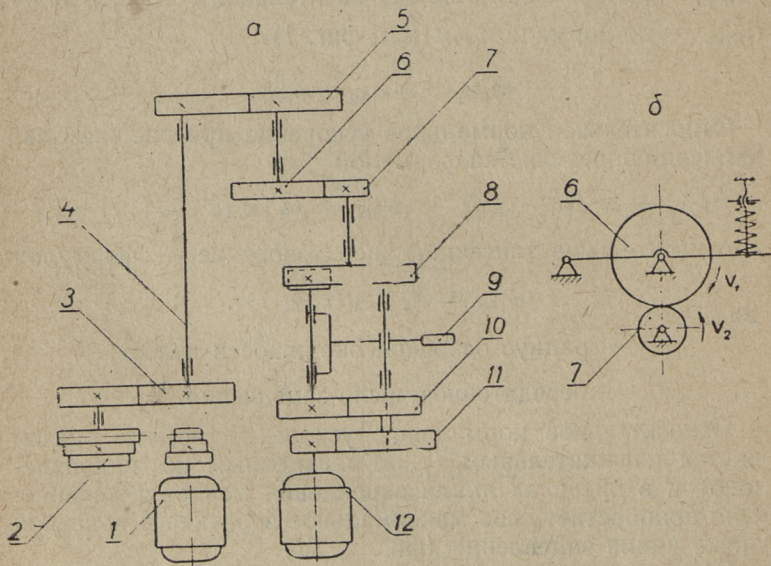
как это вытекает и из графика скорости относительного скольжения (фиг. 1, I).

Можно предполагать, что относительное ускорение имеет влияние как на температурный режим в контактной зоне, так и на гидродинамическое давление, возникающее в смазочном слое. Если это так, то оно должно иметь влияние и на встречающееся в зубчатых передачах явление заедания.

Таким образом представляется необходимым исследовать влияние периодического изменения скорости скольжения и соответствующего относительного ускорения.

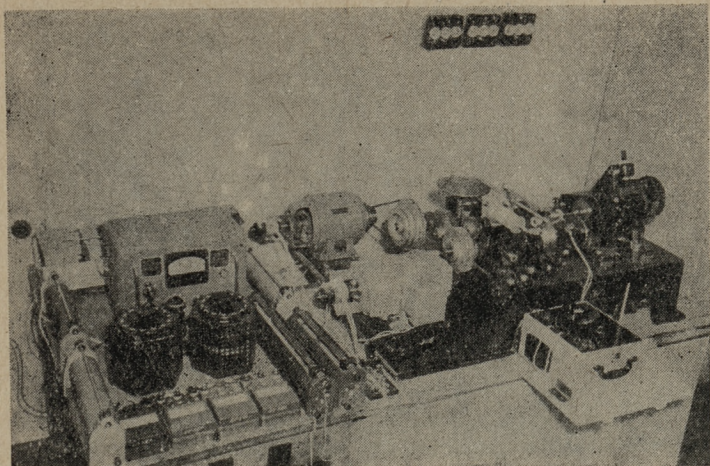
### 3. Описание экспериментальной установки

Явление заедания исследуется на роликовой машине, созданной на базе машины МИ; в качестве образцов используются два ролика. Ролики прижаты друг к другу с некоторой силой и вращаются с линейной скоростью, при которой имеет место качение со скольжением, как это наблюдается в зубчатых передачах.



Фиг. 2. Кинематическая схема экспериментальной установки





Фиг. 3. Общий вид экспериментальной установки

Кинематическая схема экспериментальной установки приведена на фиг. 2-а, а общий вид — на фиг. 3. Вращательное движение от двигателя постоянного тока 1 с регулируемой скоростью вращения передается через клиноременную передачу 2 и зубчатую передачу 3 на вал 4 и дальше через зубчатую передачу 5 на верхний ролик 6. Нижний ролик 7 проводится во вращение другим электродвигателем постоянного тока 12 с регулируемой скоростью вращения, через зубчатые передачи 8, 10 и 11.

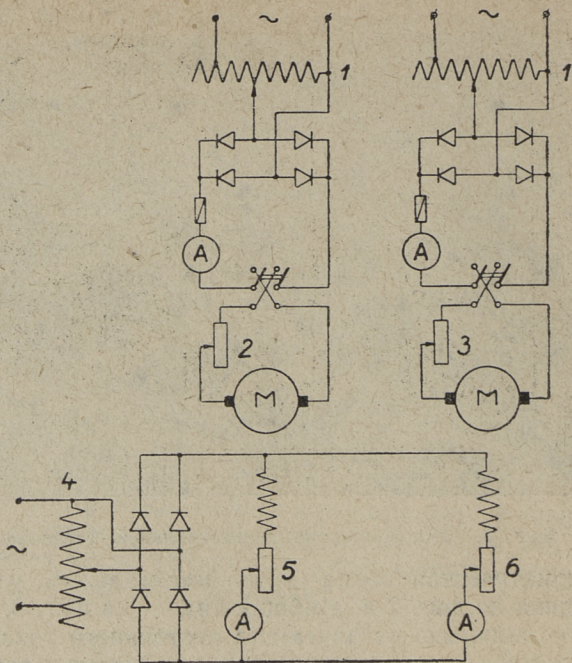
Электрическая схема регулирования скорости двигателей изображена на фиг. 4. Как видно из схемы, регулирование скоростей обоих двигателей производится путем изменения напряжения в цепи якоря при помощи автотрансформатора 1 и реостатов 2 и 3, соединенных последовательно с якорем. Регулирование скорости оказывается возможным и при помощи автотрансформатора 4, находящегося в цепи возбуждения, и реостатов 5 и 6, включенных последовательно с обмоткой возбуждения.

Верхний ролик может работать в двух режимах скоростей: 1) с периодически изменяющейся линейной скоростью, т. е. со скоростью

$$v_1 = v_1(\varphi),$$

где  $v_1$  — линейная скорость верхнего ролика;

$\varphi$  — угол поворота вала 4;



Фиг. 4. Электрическая схема экспериментальной установки

2) с постоянной скоростью  $v_1 = \text{const}$ .

Нижний ролик вращается с постоянной скоростью  $v_2$ , независимо от режима скорости верхнего ролика.

Так как ролики вращаются в противоположном направлении, то скорость скольжения относительно верхнего ролика равна разности линейных скоростей:

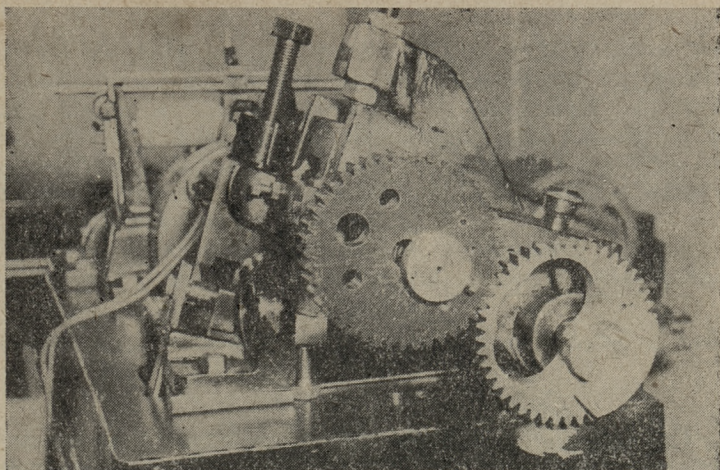
$$v_{ск} = v_1 - v_2$$

Кинематическая схема установки позволяет при противоположном вращении роликов получить скорости скольжения до 5 м/сек.

Для получения периодически изменяющейся скорости верхнего ролика используются зубчатые передачи с эллиптическими колесами со средним передаточным числом  $i = 1$  и межцентровым расстоянием  $A = 135$  мм (фиг. 5).

На фиг. 6 показана зависимость линейной скорости  $v_1$  верхнего ролика от угла поворота вала 4 (фиг. 2,а). Гра-





Фиг. 5. Зубчатая передача с эллиптическими колесами

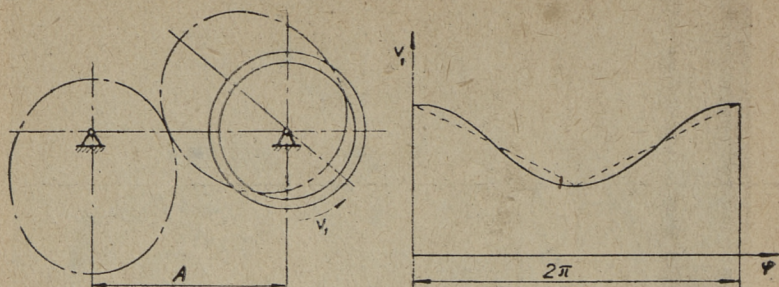
фик показывает, что скорость ролика изменяется почти линейно. Таким образом скорость скольжения, обусловленная различными линейными скоростями верхнего и нижнего роликов, изменяется приблизительно по линейному закону и достаточно хорошо воспроизводит действительный режим скольжения в зубчатых передачах.

При постоянной линейной скорости верхнего ролика применяется зубчатая передача 5 (фиг. 2, а) с круглыми колесами.

Форма и размеры испытуемых образцов даны на фиг. 7.

Материалы образцов: для верхнего ролика — сталь 45, для нижнего ролика — стали 45 и 45Х. Ролики прижимаются друг к другу пружиной (фиг. 2, б), вызывающей в них контактные напряжения сжатия до  $12500 \text{ кг/см}^2$  (по Герцу).

Испытательная машина снабжена маятниковым динамометром 10 (фиг. 2, а), позволяющим измерить момент трения до  $150 \text{ кгсм}$ . Под действием силы трения, возникающей на нижнем ролике, маятник отклоняется от вертикального положения. Момент трения уравнивается подвешенными к маятнику грузами. Самопишущее устройство позволяет получить запись изменения момента трения по времени.



Фиг. 6. Зависимость скорости верхнего ролика от угла поворота двигателя

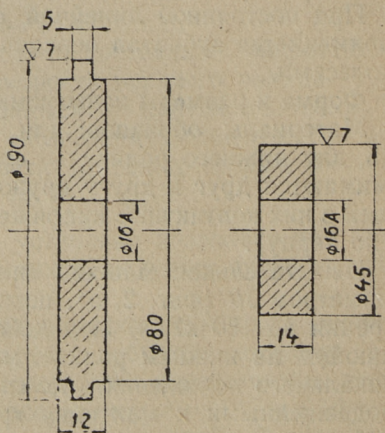
Смазка роликов осуществляется окунанием нижнего ролика в масло на заданную глубину. Для смазки роликов применяется масло «Индустриальное 20».

#### 4. Методика испытания

Чтобы вызвать заедание поверхности роликов, применяется метод ступенчатой нагрузки. После достижения в месте контакта установившегося режима трения, т. е. после того, когда момент трения и объемная температура приобретают установившееся значение, переходят на следующую ступень нагрузки. Нагрузка на ролики при определенном режиме скоростей скольжения повышается по ступеням до значения, при котором возникает заедание.

При предварительных опытах определена величина ступени нагрузки, а также продолжительность испытания.

Чтобы избежать влияния макро- и микрогеометрии образ-

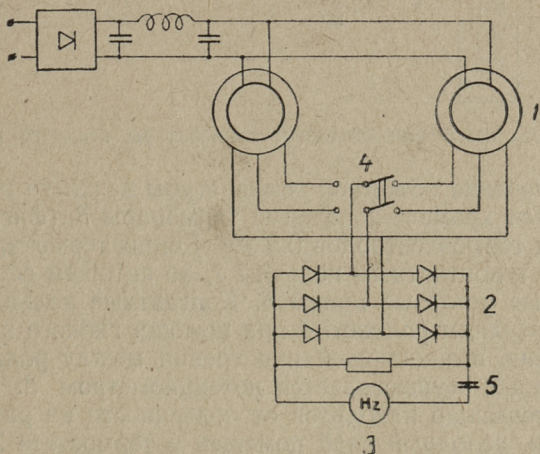


Фиг. 7. Опытные образцы



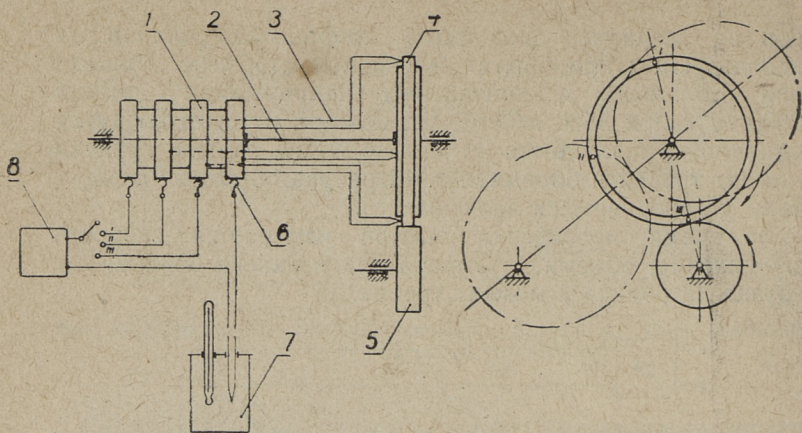
цов на заедание, проводится приработка роликов на используемом при опытах масле при скорости скольжения  $1,6 \text{ м/сек}$  и контактных напряжениях сжатия  $2500 \text{ кг/см}^2$  и  $3500 \text{ кг/см}^2$ . На каждой ступени нагрузки приработка проводится 30 мин. В конце каждой ступени момент трения и объемная температура образца приобретали установившееся значение.

Во время проведения опытов измеряется скорость скольжения, объемная температура верхнего ролика, нагрузка на ролике и момент трения.



Фиг. 8. Схема измерения скорости вращения электродвигателей

Скорость скольжения роликов определяется путем измерения скорости вращения электродвигателей механическим и электрическим тахометрами. В качестве электрического тахометра применяются сельсины 1 в комплекте с электронным частотомером 3 (ИЧ-6) (фиг. 8). Для получения подходящего диапазона частот, между сельсинами и частотомером включается ушестеритель частот (трехфазный мостовой выпрямитель 2 с простейшим фильтром постоянного тока 5). В результате ушестерения частоты частотомер показывает уже не частоту, а число оборотов в минуту. При помощи переключателя 4 частотомер присоединяется к тому или другому сельсину.



Фиг. 9. Схема измерения объемной температуры верхнего ролика

Для измерения объемной температуры верхнего ролика используется хромель-копелевые термопары 3 (фиг. 9) с диаметром термоэлектродов 0,5 мм. Концы термопар присоединены к контактным кольцам 1, по которым скользят проволочные петлевые щетки 6. Контактные кольца соединены с верхним роликом 4 при помощи гибкого валика 2. Измерение возникающей при трении между роликами термо — э.д.с. осуществляется потенциометром 8. Горячий спай термопар находится от поверхности на расстоянии 1,6 мм, холодный спай помещен в термостате 7.

Момент трения измеряется при помощи самопишущего устройства. По моменту трения определяется коэффициент трения из формулы

$$f = \frac{M_{тр}}{r \cdot P}$$

где  $M_{тр}$  — момент трения, кгсм;

$r$  — радиус нижнего ролика, см;

$P$  — нагрузка на ролике, кг.

За критерий заедания принято резкое увеличение момента трения в месте контакта роликов.

Результаты исследования, полученные в условиях изменяющихся по времени относительных скоростей, сопоставляются с данными, полученными при двух постоянных скоростях скольжения. Этими постоянными скоростями скольжения выбраны максимальная и средняя скорости скольжения переменного режима.



## ЛИТЕРАТУРА

1. М. Д. Генкин, Н. Ф. Кузьмин, Ю. А. Мишарин. Вопросы заедания зубчатых колес. АН СССР, Москва, 1959.
2. Я. Г. Кистьян. Критерии заедания поверхностей зубьев зубчатых колес. Вестник машиностроения, № 10, 1958.
3. В. А. Гавриленко. Цилиндрическая эвольвентная зубчатая передача. Москва, 1956.

СБОРНИК СТАТЕЙ  
ПО ИЗНАШИВАНИЮ И ЗАЕДАНИЮ  
МАТЕРИАЛОВ

Таллинский политехнический институт

Редактор А. Ершов

Технический редактор Я. Мыттус

Корректор Р. Сиймпоег

Сдано в набор 1 XII 1961. Подписано к печати 21 II 1962. Бумага 54×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Печатных листов 5. По формату 60×92, печатных листов 4,1. Учетно-издательских листов 3,75. Тираж 600 экз. МВ-00252. Заказ 2174.

Типография «Пунане Тяхт», Таллин,  
ул. Пикк 54/58.

Цена 26 коп.





26 коп.

