

УДК 621.791; 621.891

**ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ НАПЛАВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ТРЕНИИ КАЧЕНИЯ***В. В. Рубанов, С. Д. Колотиенко*

Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация  
[prepodtkm@donstu.ru](mailto:prepodtkm@donstu.ru)

Исследовано изнашивание материалов, применяемых при индукционной наплавке. Испытывались материалы на основе железа, никеля и кобальта. Замерялся линейный износ, записывался профиль изношенной поверхности, контролировалось усилие прижима роликов. За величину контактной усталости принималось число циклов обкатывания соответствующих выкрашиванию 10 % поверхности. Построенные кривые износа показывают зависимость величины линейного износа ( $I_h$ ) от продолжительности испытания, выраженная через число циклов обкатывания ( $N_f$ ). Максимальной износостойкостью из исследованных материалов обладают сплавы на основе кобальта. Установлено, что микротрещины начинают зарождаться с поверхности на различных дефектах структуры. Дальнейшее развитие трещин приводит к выкрашиванию отдельных блоков, расположенных поперек направления обкатывания.

**Ключевые слова:** линейный износ, усталые микротрещины, выкрашивание блоков, лепестки износа.

**Введение.** Исследование износостойкости наплавочного слоя, полученного индукционной наплавкой порошковых износостойких материалов в парах трения качения, актуально для получения высококачественного наплавленного слоя и разработки технологии индукционной наплавки. Это способ упрочнения быстроизнашивающихся деталей, таких как валки поперечно-клиновой прокатки и кулаки цепевязальных автоматов. Упрочнение поверхностей деталей требует обоснования использования выпускаемых промышленных наплавочных материалов на основе железа (сормайт), никеля (колмоной) и кобальта (стилита).

UDC 621.791; 621.891

**WEAR RESISTANCE OF SURFACING MATERIALS WITH ROLLING FRICTION***V.V. Rubanov, S.D. Kolotienko*

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

[prepodtkm@donstu.ru](mailto:prepodtkm@donstu.ru)

The purpose of this work is to study the wear resistance of materials used in the induction surfacing. The authors tested materials based on iron, nickel and cobalt, measured linear wear, recorded worn-out surface profile, controlled the pressure of the rollers. As the value of contact fatigue the authors took a number of rolling cycles corresponding to 10% of the surface chipping. The constructed wear curves results show the dependence of the linear wear ( $I_h$ ) on the duration of the test, expressed in the number of rolling cycles ( $N_f$ ). It can be seen that among the investigated materials cobalt-based alloys have the maximum wear resistance. The authors have established that micro-cracks begin to emerge from the surface at various structural defects. Further development of cracks leads to individual blocks rolling located crosswise of rolling direction.

**Keywords:** linear wear, weary micro cracks, chipping blocks, wearing.

**Методика исследования.** Исследование износостойкости материалов, применяемых при индукционной наплавке, проводилось по схеме «качение без проскальзывания» [1–4]. Ролик с наплавленной цилиндрической поверхностью диаметром 120 мм и шириной 10 мм обкатывался контролликом диаметром 50 мм и шириной 5 мм. Материал основы наплавленного ролика — сталь 45, материал контролика — сталь ШХ-15. Контролик закаливался до твердости HRC 61–63. Испытания проводились в условиях смазки маслом «Индустриальное 20». Контактные давления при испытаниях составляли 1,3–1,8 ГПа, при частоте вращения наплавленного ролика 10 об/с.

Испытывались материалы на основе железа, никеля и кобальта; марки, химические составы и твердости после наплавки, которых приведены в таблице 1 [5].

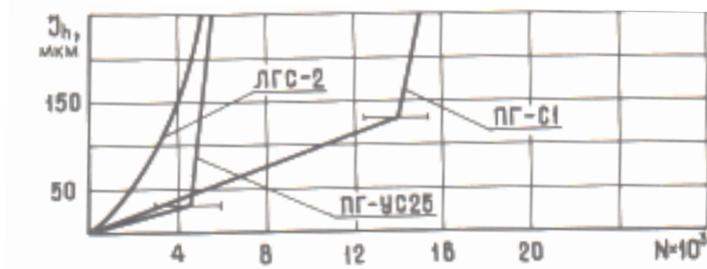
Таблица 1

Химический состав исследуемых материалов

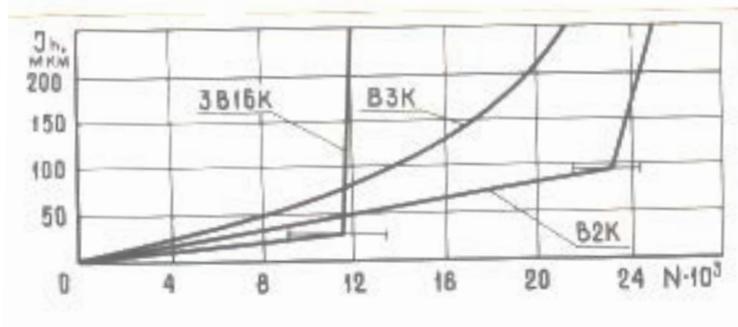
Сплав	Химический состав										Твердость, HRC
	C	Cr	Ni	Fe	Co	W	B	Si	Mn	Cu	
ПГ-С1	3,0	30,0	3,0	ост.	—	—	—	2,8	0,5	—	56
ГС-2	1,44	18,0	3,1	ост.	—	—	0,7	3,2	3,0	2,5	48
ПГ-УС25	4,8	39,0	1,8	ост.	—	—	—	2,0	0,7	—	60
ЗВ16К	3,0	24,0	—	—	ост.	18,0	—	1,2	2,0	—	53
В3К	1,35	31,0	2,0	0,9	ост.	4,7	—	2,7	—	—	45
В2К	1,4	23,5	2,0	2,3	ост.	12,5	—	1,6	—	—	50
ПГ-СР2	0,6	14,0	ост.	5,0	—	—	2,1	2,3	—	—	37
ПГ-СР3	0,7	16,0	ост.	5,0	—	—	3,0	3,0	—	—	52
ПГ-СР4	0,6	15,0	ост.	5,0	—	—	3,4	3,3	—	—	57

Индукционная наплавка образцов проводилась последовательным способом с предварительным припеканием наплавочной шихты. При испытаниях периодически замерялся линейный износ, записывался профиль изношенной поверхности, контролировалось усилие прижима роликов. Исследования проводились до величины линейного износа, равной 200 мкм, а за величину контактной усталости принималось число циклов обкатывания, соответствующих выкрашиванию 10% поверхности.

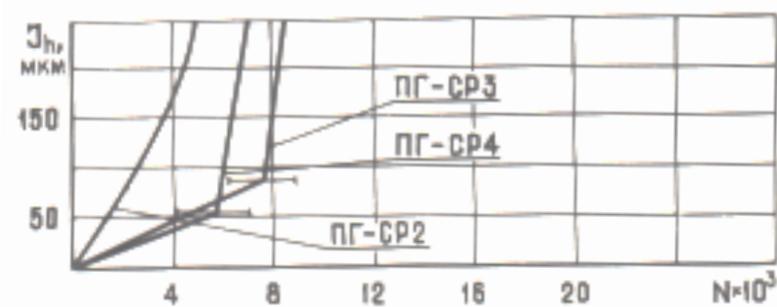
**Результаты и их обсуждение.** По результатам испытаний построены кривые износа (рис.1), которые показывают зависимость величины линейного износа  $I_h$  от продолжительности испытания, выраженная через число циклов обкатывания  $N_f$ .



а)



б)



в)

Рис. 1. Зависимость величины линейного износа наплавочных материалов при трении качения от продолжительности испытаний: а) сплавы на основе железа; б) сплавы на основе кобальта; в) сплавы на основе никеля ( $p=1,3-1,8$  Гпа,  $V=1,4-1,6$  м/с)

На рис.1а представлены кривые износа сплавов на железной основе. Вид кривых износа у этих материалов примерно одинаков. Кривые сплавов ПГ-С1 и ПГ-УС25 имеют перегиб, обусловленный резким увеличением скорости выкрашивания. У сплава ЛГС-2 резкого изменения скорости изнашивания и связанного с этим перегиба не наблюдается, но контактная долговечность этого сплава минимальная. Наибольшую износостойкость показал сплав ПГ-С1, разрушение 10 % поверхности которого происходит через  $11,3 \cdot 10^6$  циклов. Как показали исследования, во всех

случаях разрушение 10% поверхности происходит не более чем через несколько десятков тысяч циклов после того, как на кривых износа фиксируется перегиб.

Кривые износа кобальтовых наплавочных материалов представлены на рис.1б. У сплавов В2К и ЗВ16К резкое увеличение скорости изнашивания наступает, когда число циклов обкатывания составляет  $16 \cdot 10^6$  и  $12 \cdot 10^6$  циклов.

У сплавов на никелевой основе (рис.1в) вид кривых износа сходен со сплавами на основе железа. Сплав ПГ-СГ2 характеризуется максимальной скоростью изнашивания и минимальной контактной долговечностью. У сплавов ПГ-СР3 и ПГ-СР4 на кривых износа наблюдаются перегибы и дальнейший резкий рост скорости изнашивания.

На рис.1 видно, что максимальной износостойкостью из исследованных материалов обладают сплавы на основе кобальта. Для наиболее износостойких сплавов характерны перегибы на кривых износа, обусловленные резким увеличением скорости изнашивания.

Анализируя изнашивание исследуемых материалов при качении, можно отметить, что на первой стадии изнашивания до перегиба кривых износа скорость изнашивания не определяет средней износостойкости материалов. Так сплавы ПГ-УС25, ЗВ16К, ПГ-СР4, имея сначала наименьшую скорость изнашивания, каждый в своей группе сплавов, в дальнейшем разрушаются быстрее. Для материалов, отличающихся минимальной износостойкостью, как правило, перегибы на кривых износа отсутствуют, скорость их изнашивания максимальна с самого начала и растет в процессе испытаний. Характерно, что стадии приработки у наплавочных материалов нет, а у сплавов с повышенной износостойкостью имеется начальный период когда линейный износ не обнаруживается.

Фрактографическими и металлографическими исследованиями установлено, что микротрещины начинают зарождаться с поверхности на различных дефектах структуры. Под поверхностью трещины не зарождаются. Дальнейшее развитие трещин приводит к выкрашиванию отдельных блоков, расположенных в большинстве случаев поперек направления обкатывания.

Материалы с малой твердостью (ЛГС-2, ВЗК, ПГ-СР2) изнашиваются в результате разрушения поверхностного слоя в виде отслаивания, поскольку первичные трещины растут под острым углом к поверхности, при этом процесс разрушения сопровождается пластической деформацией тонкого поверхностного слоя [6,7]. Размеры лепестков увеличиваются по мере продолжения испытаний и максимальны на конечной стадии. В условиях трения качения исследуемые материалы в гораздо меньшей степени подвергаются абразивному изнашиванию, чем при трении скольжения, а явлений схватывания трущихся поверхностей не обнаруживается.

Остальные материалы изнашиваются за счет двух основных процессов: выкрашивания мелких частиц (как правило, это отдельные крупные структурные составляющие — карбиды) и выкрашивания крупных блоков. Выкрашивание структурных составляющих особенно характерно для сплавов ПГ-УС25 и ЗВ16К и происходит на средней и конечной стадиях изнашивания. Выкрашивание блоков наблюдается у всех высокотвёрдых материалов и протекает, главным образом, на последней стадии изнашивания. В отличие от отслаивания, когда первичные микротрещины растут под острым углом к поверхности трения, при выкрашивании направление их развития близко к нормали и происходит в условиях упругой деформации. На глубине 150-200 мкм микротрещины резко изменяют направление, что вызывает отделение крупных блоков. Такое разрушение поверхности приводит к появлению на кривых износа перегибов, рельеф поверхности становится грубым, покрытым крупными ячейками.

Процессы, происходящие при изнашивании исследуемых наплавочных материалов при качении, условно можно изобразить системой, показанной на рис.2.

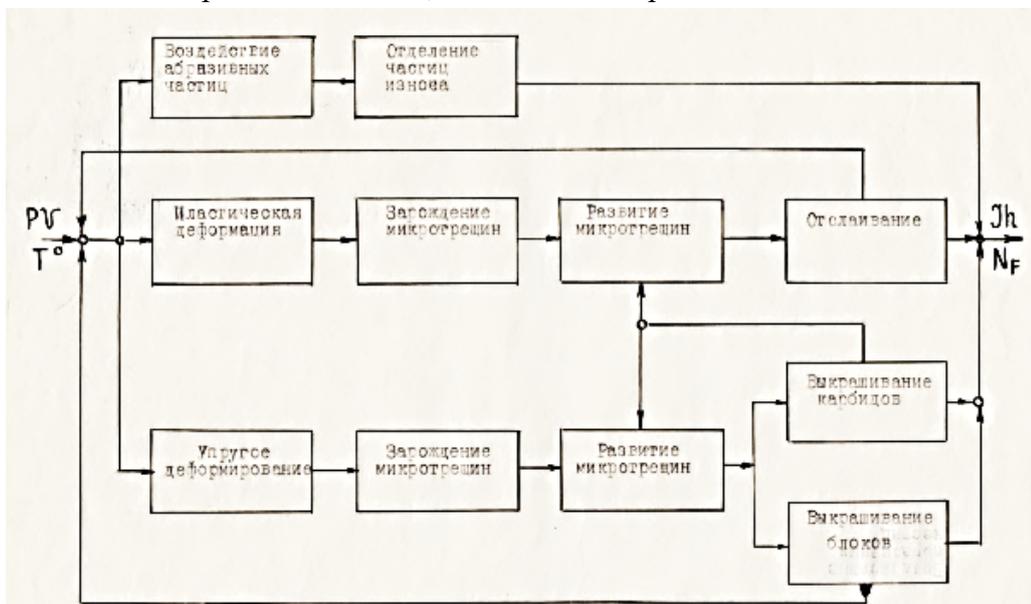


Рис. 2. Модель процессов изнашивания наплавочных материалов при качении в условиях тяжелого нагружения.

На входе системы действуют давление  $P$ , скорость  $U$ , температура  $T^\circ$ , которые являются основными параметрами, определяющими внешнее воздействие, из которых главным следует считать давление. На выходе системы показаны величина линейного износа  $I_h$  и число циклов  $N_f$ , соответствующее началу катастрофического износа поверхности трения.

Подсистема процессов, включающая разрушение поверхностного слоя в результате пластической деформации и абразивного изнашивания, характерна для материалов малой твердости. Подсистема, состоящая из процессов, приводящих к разрушению поверхности трения от упругих деформаций, характерна для более твердых исследованных наплавочных материалов.

В процессе испытаний на входные параметры системы влияют обратные связи, обусловленные образованием нового рельефа изнашиваемой поверхности. Появление частиц износа изменяет условия взаимодействия контактирующих поверхностей, увеличивая или уменьшая интенсивность изнашивания. Увеличение скорости изнашивания наблюдается, когда образуется грубый рельеф в результате выкрашивания блоков. Снижение скорости изнашивания происходит если интенсивность образования лепестков износа настолько велика, что трещины выкрашивания не развиваются. Выкрашивание хрупких структурных составляющих вызывает износ поверхностного слоя и ускоряет процесс зарождения новых микротрещин. В процессе изнашивания материалов с твердостью ниже 48 HRC может происходить отделение тонких слоев или грубое отслаивание, характерное для последнего периода изнашивания. Выкрашивание как карбидов, так и крупных блоков следует считать хрупким, т.к. не наблюдается объемной пластической деформации поверхностного слоя.

### Выводы.

1. Износостойкость наплавочных материалов при качении определяется наиболее длительной стадией процесса разрушения поверхностного слоя — стадией развития усталостных микротрещин.

2. Твердость наплавочных материалов не определяет однозначно их износостойкость, поскольку повышение твердости связывается с увеличением доли твердых, но хрупких карбидов, поэтому раньше начинается процесс выкрашивания. У материалов, твердость которых мала, быстрее наступает отслаивание, выше его интенсивность, результатом чего является их невысокая износостойкость.

3. От наплавочных материалов при качении в условиях высоких нагрузок требуется оптимальное значение твердости.

#### **Библиографический список**

1. Рубанов, В. В. Установка для исследования изнашивания наплавочных материалов при трении качения / В. В. Рубанов, С. Д. Колотиенко // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2011. — № 9. — С.78 – 86.

2. Сулейманов, В. Н. Исследование изнашивания и повышения износостойкости тяжело нагруженных кулаков кузнечно-прессовых машин, работающих в условиях трения качения: дисс...канд.тех.наук / В. Н. Сулейманов — Ростов-на-Дону, 1978. — 150 с.

3. Установка для испытания на контактную прочность материалов : а. с. 678389 СССР / Л. В. Красниченко, В. Н. Сулейманов, В. В. Рубанов, С. Д. Колотиенко. — 1979. — Бюл. № 29. — 6 с.

4. Образец для испытания покрытий на износ : а. с. 1363007 СССР, МКИ<sup>3</sup> / В. В. Рубанов, С. Д. Колотиенко, А. Л. Пивоваров и др. — 1987. — Бюл. № 48. — 4 с.

5. Наплавочные материалы стран-членов СЭВ / Каталог. — Киев-Москва, 1979. — 250 с.

6. Suh N. P. The delamination theory of wear / N. P. Suh // Wear. — 1973. — Vol. 25, № 1 — P. 111–123.

7. Suh N. P. An overview of the delamination theory of wear / N. P. Suh // Wear. — 1977. — Vol. 44, № 1 — P. 1–16.