

УДК 621.923.12

С.Л. Евтифеев, канд. техн. наук, Д.О. Крушельницький, Одесса, Україна

## РАЗРАБОТКА ИЗНОСОСТОЙКОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Fe-Si-Cu-C

*Цель работы – разработать новый сплав на основе системы элементов Fe-Si-Cu-C для увеличения ресурса кулачковых механизмов, работающих на трение, методом нанесения дополнительного покрытия, имеющее антифрикционные свойства, и стоимость которого будет не велика, поскольку состав сплава для покрытия не будет содержать в себе дефицитных и дорогих компонентов.*

**Ключові слова:** *увеличения ресурса кулачковых механизмов, покрытия*

*Мета роботи – розробити новий сплав на основі системи елементів Fe-Si-Cu-C для збільшення ресурсу кулачкових механізмів, що працюють на тертя, методом нанесення додаткового покриття, яке має антифрикційні властивості, і вартість якого буде не велика, оскільки склад сплаву для покриття не буде містити в собі дефіцитних і дорогих компонентів.*

**Ключевые слова:** *збільшення ресурсу кулачкових механізмів, покриття*

*The aim of work is to develop a new alloy based on a system of Fe-Si-Cu-C elements to increase the life of the cam mechanisms operating on friction by an additional coating method having antifriction properties and the cost of which will not be great, since the composition of the coating alloy will contain scarce and expensive components.*

**Keywords:** *increase in life of cam mechanisms, coating*

Как известно, каждая деталь или составляющая любого оборудования имеет свой ресурс, по истечению которого деталь подлежит либо замене на новую, либо восстановлению, ресурс же детали зависит от многих факторов, главными из которых являются:

- соответствие материала, из которого изготовленная данная деталь условиям эксплуатации;
- условия эксплуатации детали должны соответствовать требованиям технической документации;
- её регламентное обслуживание и т.д.

Важнейшим фактором работоспособности детали является материал, из которого она изготовлена. В большинстве случаев применяются известные стали и сплавы, а условия эксплуатации подгоняются под свойства известных материалов. Поэтому разработка материалов и покрытий для конкретных условий работы является актуальной задачей, которая не имеет общего решения до настоящего времени.

В современных машинах, особенно в машинах-автоматах, широко используются механизмы, позволяющие в пределах рабочего цикла иметь Висту (остановку) выходного звена заданной длительности при непрерывном

движении выходного звена. Такие механизмы получили название механизмов прерывистого движения, или механизмов с Вистой (остановкой). Для этого используют различные механизмы: кулачковые, мальтийские, храповые, с неполнозубыми колёсами, рычажные и комбинированные (зубчато-рычажные, кулачково-рычажные и др.) Наибольшее распространение получили кулачковые механизмы, а потому рассмотрим их в первую очередь.

Кулачковыми называют механизмы, в состав которых входит высшая кинематическая пара, одним из элементов которой является поверхность переменной кривизны. Звено, которому принадлежит элемент высшей кинематической пары, выполненный в виде поверхности переменной кривизны, называют кулачком.

Закон движения толкателя определяется профилем кулачка, который является своеобразной программой работы исполнительного органа механизма. Поскольку этот профиль может быть разным, то с помощью кулачковых механизмов можно обеспечить почти любой закон движения выходного звена. Это основное достоинство кулачковых механизмов, которое объясняет широкое применение этих механизмов в технике, особенно в сложных машинах-автоматах, где надо обеспечить согласованное движение многих исполнительных органов.

Одновременно кулачковые механизмы имеют существенные недостатки, основным из которых является наличие у них высшей кинематической пары, в которой контакт между звеньями происходит в точке или по линии. Здесь возникает большое удельное давление, что приводит к быстрому износу соприкасающихся деталей, особо опасен износ кулачка, поскольку он обеспечивает закон движения выходного звена, например, в механизмах газораспределения двигателей внутреннего сгорания, а именно распределительный вал – рычаг привода клапана.

Нередко в таких случаях на распредвалах видны так называемые следы побежалости, а они обычно являются спутниками масляного «голодания», вследствие чего происходит нагрев поверхности при трении и собственно сам износ, это и есть основная проблема.

Целью работы является разработка сплава, который бы обеспечивал высокую износостойкость и долговечность в сложных условиях работы кулачковых механизмов при трении качения с проскальзыванием.

Например, подшипниковые сплавы, которые обладают неоднородной структурой, улучшающей подвод масла к вращающемуся валу, имеют хорошую прочность на сжатие, износ, и при всём этом имеют достаточную твёрдость, но не применяются в кулачковых механизмах из-за низкого временного сопротивления растяжению и малой контактной прочности.

Частые примеры решения задачи выбора сплава для заданных условий работы:

– антифрикционные чугуны, марки СЧ20 или СЧ30, это сплавы, на основе железа, которые представляют собой перлитный чугун с мелкими графитовыми включениями.

– антифрикционные сплавы (баббиты), которые применяют для заливки вкладышей подшипников, как пример марка Б83 – сплав на основе олова, содержащий 83% олова, 11% сурьмы и 6% меди. Имеет данный сплав 3 фазы;  $\beta$  фаза – светлые гранённые первичные кристаллы (твёрдые включения),  $\alpha$  фаза – тёмные кристаллы раствора на базе олова (мягкие включения) и  $\gamma$  фаза ( $\text{Cu}_3\text{Sn}$ ) – звёздочка-образные белые кристаллы.

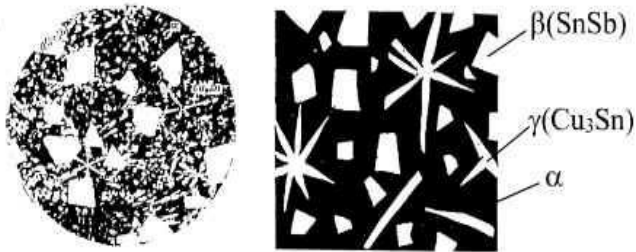


Рисунок 1 – Микроструктура баббита Б83,  $\times 200$

Во всех этих примерах реализуется принцип Шарпи, суть которого заключается в том, что основное правило расположения в сплаве структурных фаз, обеспечивающих высокие антифрикционные и износостойкие свойства сплава, а также его прочность, вязкость и другие свойства. По принципу Шарпи – наиболее твёрдые структурные составляющие должны располагаться в виде изолированных друг от друга включений, а наиболее вязкие – образовывать сплошную матрицу. Сплав разработан для подшипников скольжения.

В процессе трения происходит износ мягких фаз, и образуются поры на поверхности, которые позволяют, получить эффект удерживания смазки на поверхности, что важно в процессе эксплуатации, особенно в моменты «пуска-остановки» когда давление масла для смазывания поверхностей трения недостаточно.

В настоящее время в качестве материала кулачков механизмов газораспределения используются чугуны марок ВЧ50, ВЧ60, КЧ50-4 или конструкционные среднеуглеродистые и низколегированные стали типа сталь 45, 40Х после закалки т.в.ч. или азотирования. Срок службы этих пар трения не превышает 150 – 160 тыс. км пробега [3, 4].

В работе применен кардинальный подход к изменению материалов пары трения кулачковых механизмов и изучены новые сплавы на базе системы элементов Fe-Si, доменный ферросилиций с легирующими добавками.

В настоящее время сплавы системы Fe-Si не исследованы для трения скольжения и качения, особенно если в этих сплавах повышенное содержание углерода (1% и более). Особый интерес представляет легирование этих сплавов Си и Мо [1].

В основном ферросилиций используют в качестве легирующей добавки при выплавке и модифицированию чугуна либо в электротехнике, так как он имеет низкое содержание углерода, увеличение которого обеспечивает повышение стойкости к трению и является дешевым аналогом FeMo и FeMn.

Медь – это пластичный, золотисто-розовый металл с характерным металлическим блеском, находящийся на втором месте по электропроводности (уступая серебру), довольно распространённый, и относительно не дорогой металл, часто использующийся как в электротехнике, так и в машиностроении (в качестве примеси). Известно, что присутствие меди в закрытых и полужакрытых системах трения может образовывать эффект избирательного переноса с образованием сервоитных плёнок, что снижает износ трущихся поверхностей и является полезным в тех местах, где реализуется механизм трения, качения и скольжения. Условия образования сервоитной пленки является присутствие на поверхности трения поверхностно активных веществ. [4]

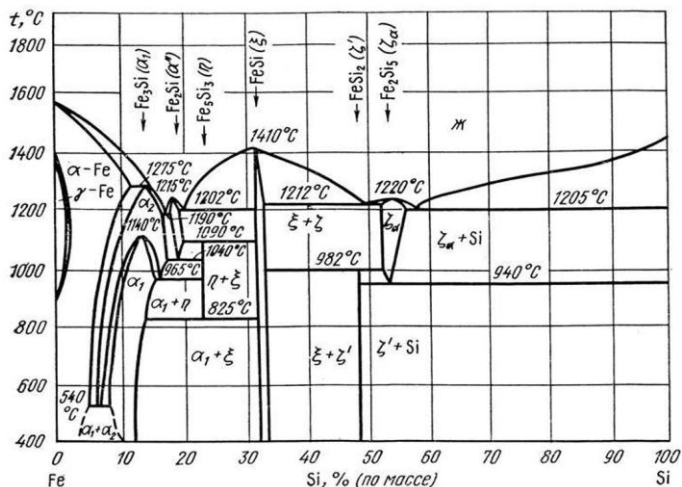
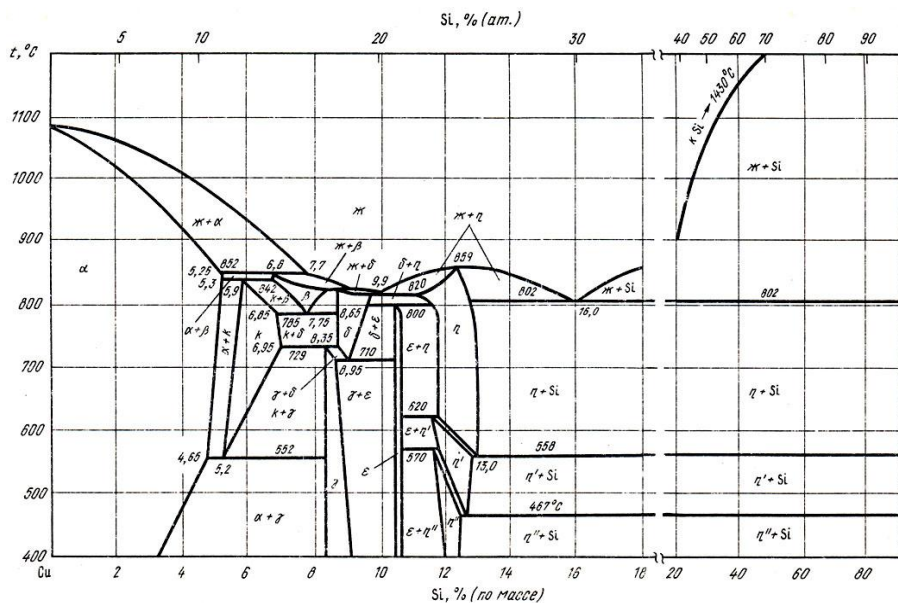


Рисунок 2 – Диаграмма состояния системы Fe-Si [2]

На рис. 2 приведена диаграмма состояния сплавов системы Fe-Si во всём объёме концентраций. Особенности этой диаграммы является то, что сплавы с содержанием Si до 7% используются в виде электротехнических сталей, а на трение такие сплавы вообще не испытывались. Интерес представляют сплавы с содержанием Si до 20 % где образуются группа твердых упорядоченных растворов  $\alpha + \alpha_1 + \zeta$  при наличии перитектических и перитектоидных реакций в области температур 1200 – 1275 °С.

По аналогии с эвтектическими сплавами, сплавы перитектического типа обладают хорошей жидкотекучестью, не высокой температурой плавления и легко наплавляются всеми способами наплавки.

Повышенное содержание углерода в доменных ферросилициях до 1,5 % формирует в структуре цементит, что увеличивает твердость и хрупкость сплавов. Поэтому представляет интерес введение в сплав пластичной меди, что может обеспечить снижение хрупкости сплавов, повышение теплопроводности покрытий после наплавки и высокие антифрикционные свойства.



На рис. 3 приведена диаграмма системы двойных сплавов Si-Cu. Известны кремнистые бронзы, обладающие высокой твердостью и износостойкостью. Однако, прочность и литейные свойства этих бронз уступают оловянистым. Также, у высококремнистых бронз антифрикционные свойства оставляют желать лучшего.

Принципиально рассматриваются сплавы при содержании меди до 25 %. Диаграмма состояния в данном случае содержит как эвтектические, так и перитектические реакции. Особенно это проявляется при содержании Cu 15 % с образованием эвтектики состава  $\eta + \text{Si}$ , что позволяет получить высокие литейные свойства для наплавки. В случае тройной системы Cu-Fe-Si возможно образование более сложных структурных составляющих и фаз, что благоприятно скажется на антифрикционности и износостойкости.

На рис. 4 изображена диаграмма двойной системы Fe-Cu. Сплавы этой диаграммы в промышленности не нашли применения.

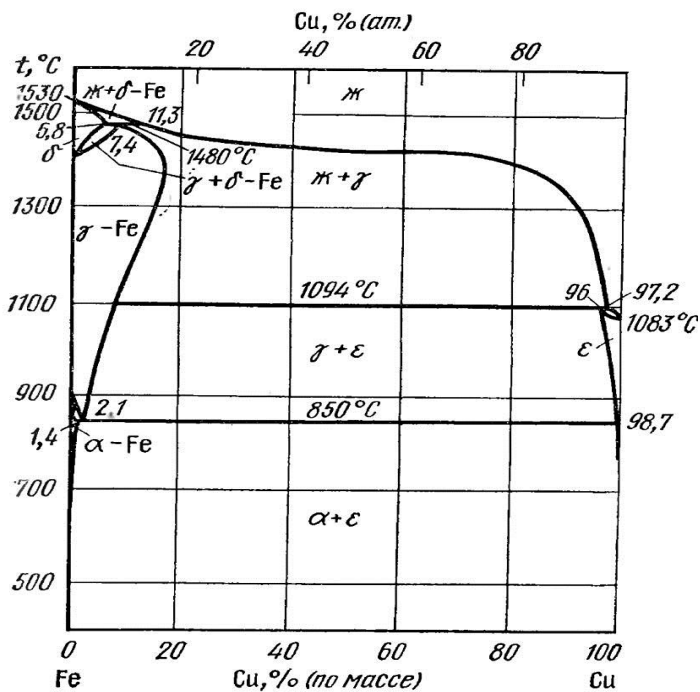


Рисунок 4 – Диаграмма состояния Fe-Cu [2]

При анализе двойных диаграмм рассматривались сплавы с содержанием Si до 20%, Cu до 25%, C до 1.5%. Вероятные фазы и структурные составляющие приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Вероятные фазы в системе Fe-Si-Cu-C

Содержание примеси	Фазы Fe-Si	Фазы Si-Cu	Фазы Fe-Cu
Si 9	$\alpha + \alpha_1 + \text{Fe}_3\text{C}$	$\alpha_1 + \gamma$	$\varepsilon + \alpha + \text{Fe}$
Si 10	$\alpha + \alpha_2 + \text{Fe}_3\text{C}$	$\alpha_1 + \alpha_2 + \gamma$	$\varepsilon + \alpha + \text{Fe}$
Si 11	$\alpha_1 + \varepsilon + \text{Fe}_3\text{C}$	$\alpha_1 + \alpha_2 + \gamma$	$\varepsilon + \alpha + \text{Fe}$
Si 12	$\alpha_1 + \varepsilon + \text{Fe}_3\text{C}$	$\alpha_1 + \alpha_2 + \eta$	$\varepsilon + \alpha + \gamma + \text{Fe}$
Si 13	$\alpha_1 + \varepsilon + \text{Fe}_3\text{C}$	$\alpha_1 + \alpha_2 + \eta$	$\varepsilon + \alpha + \gamma + \text{Fe}$

Как видно из табл. 1, имеет место от двух до трёх и более фаз в сплавах. Измерение твёрдости проводилось на микротвёрдомере ПМТ 3, при нагрузке в 20 и 50 грамм, результаты измерений занесены в табл. 2.

Таблица 2 – Микротвёрдость фаз сплава

Содержание кремния	Твёрдый раствор, состав $\alpha_1 + \alpha_2 + \gamma + \varepsilon$ , HV	Ледебуритно подобная структура ( $\varepsilon + \text{Fe}_3\text{C}$ ), HV	Фазы меди, $\alpha + \varepsilon + \gamma$ HV
Si до 10%	473	693	129
Si до 15%	318	657	172,2
Si до 20%	482	685	123,4

Для получения износостойкого сплава применяется ферросилиций, Cu15 и другие, приведённые в табл. 1, компоненты, указанные в табл. 3.

Для увеличения содержания углерода в ферросилиции FeSi25 добавляем чугуны доэвтектический перераспределительный, нагреваем до температуры 1200-1250 С, выплавляем в тигле из силицированного графита. Масса садки – до 0.5 кг, плавим на установке ТВЧ.

Таблица 3 – Химический состав FeSi15

Марка	Массовая доля, %							
	Si	Al He более	P He более	S He более	C He более	Mn He более	Cr He более	Ti He более
FeSi10	8,0-13,0	0,2	0,15	0,06	2,0	3,0	0,8	0,30
FeSi15	14,0-20,0	1,0	0,15	0,06	1,50	1,50	0,8	0,30
FeSi25	20,0-30,0	1,5	0,15	0,06	1	1	0,8	0,30

Шихта для выплавки приведена в табл. 4.

Таблица 4 – Состав шихты для выплавки сплава

№	FeSi15, %	FeSi25, %	Чугун ПЧ-2	Су- отходы	Флюс $B_2O_3+Na_2B_4O_7$
1	84	-	-	16	10% от общей массы
2	-	25	60	15	
3	-	25	50	25	

Испытания проводились на машине трения СМЦ-2 по схеме «ролик-ролик», степень проскальзывания до 20 % включительно [3].

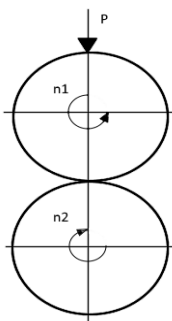


Рисунок 5 – Схема испытания на трение по системе «ролик-ролик»  
 $d= 50\text{мм}; b_1=12\text{мм}; b_2= 10\text{мм}; n_1>n_2$



Наплавка проводилась на верхній ролик. Матеріал нижнього ролика – сталь 40X, закалка + низкий отпуск, HRC 53-57.

Режим испытаний: общая нагрузка на пару трения 40 и 60 кгс, скорость вращения нижнего ролика 1000 об/мин, смазка граничная, подача в зону трения капельная на нижний ролик.

Контролювалось момент трения, діаметр роликів, маса до і після испытання. Контроль приработки проводился по установившемуся моменту трения.

Установлено, что сплавы с содержанием меди до 16% от массовой доли, в процессе приработки деформируются на величину 0,2 - 0,3 мм в сторону уменьшения диаметра, а в процессе испытаний изменение размера практически нет. По результатам испытання определили, что время приработки зависит от структуры сплава. Сплавы со структурно свободными медными фазами  $\alpha+\epsilon$ , и твёрдостью не более  $HV_{0,05} = 172-200$ , прирабатываются в 2 - 3 раза быстрее.

Наплавка проводилась на ролик или кулачек, на установке ТВЧ модели 063/440, методом диффузионного силицирования сталей.

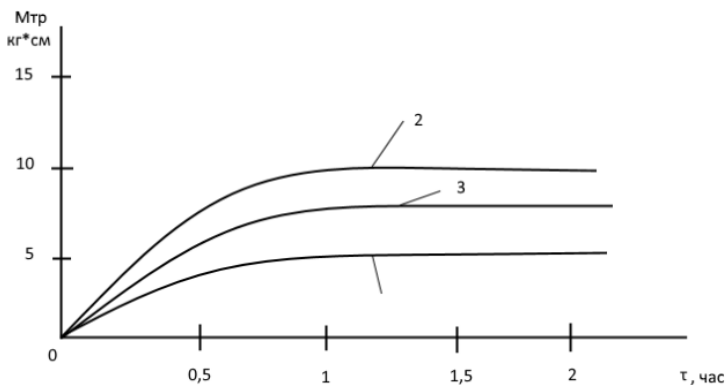


Рисунок 6 – Графік порівняння трьох сплавів з різним вмістом міді

- 1- Сплав з вмістом міді до 15% від маси;
- 2- Сплав з вмістом міді від 15 - 20% від маси;
- 3- Сплав, з вмістом міді від 20 – 25% від маси

Из рис. 6 видно, что сплав позиции 1, с содержанием меди до 15% от массовой доли наиболее хорошо себя показал в соотношении времени и износа, что наталкивает на мысль о том, что 15% содержания меди

в антифрикційному сплаві – являється найбільш актуальним содержанием по сравнению с другими образцами позиции 2 и 3.

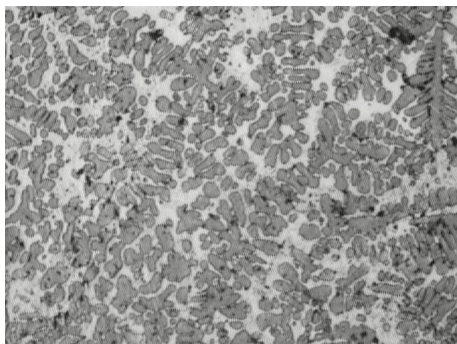


Рисунок 7 – Микроструктура сплава с содержанием Cu 25%, увеличение x240

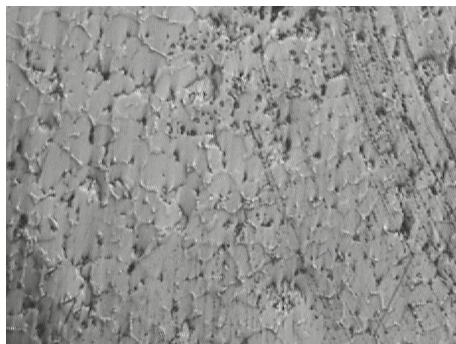


Рисунок 8 – Микроструктура сплава с содержанием Cu до 15%, увеличение x240

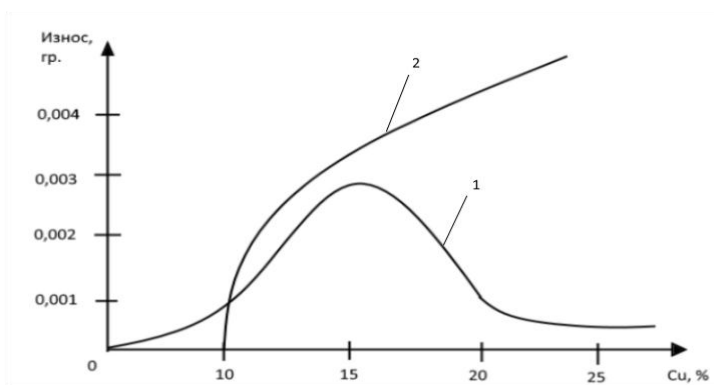


Рисунок 8 – График сравнения износа роликов  
1 – ролик с наплавкой; 2 – ролик сталь 40X (3+ O<sub>H</sub>)

Износ определялся весовым способом на аналитических весах с точностью измерения до 0,0001 гр. верхнего и нижнего роликов.

База испытаний 1000 циклов, 1 цикл = 100 оборотов ролика.

По результатам исследования было установлено, что на износостойкость влияет не только химический состав сплава, но и наличие в этом самом сплаве структурно свободных фаз меди. При увеличении количества структурно свободных фаз меди износ пары трения резко уменьшается, примерно в 2 раза.

Вывод: впервые исследован износостойкий сплав системы Fe-Si, с добавками Cu и C. Установлено, что эти сплавы имеют перспективу для применения при восстановлении и упрочнении деталей, работающих при трении качении с проскальзыванием. Впервые обнаружен эффект при обработке этих сплавов без износной деформации, что требует дальнейших исследований.

**Список используемых источников:** 1. Земсков Г.В., Витченко В.А. и др. Авторское свидетельство №864703. – 1980. – 7с. 2. Шанк Ф.А. Структуры двойных сплавов: Металлургия. – 1973. – 760с. 3. Хебды М. Трение изнашивание и смазка: Машиностроение, Варшава. – Т.1, 1989. – Т.2, 1990, – Т.3, 1992. 4. Кутьков А.А. Износостойкие и антифрикционные покрытия: Машиностроение. – 1976. – 152с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Zemskov G.V., Vitchenko V.A. i dr. Avtorskoe svidetel'stvo №864703.– 1980. – 7s. 2. Shank F.A. Struktury dvoynyh spлавov: Metallurgija. – 1973. – 760s. 3. Hebdy M. Trenie iznashivanie i smazka: Mashinostroenie, Varshava. – Т.1, 1989. – Т.2, 1990, – Т.3, 1992. 4. Kut'kov A.A. Iznosostojkie i antifrikcionnye pokrytija: Mashinostroenie – 1976. – 152s.