

**С.И. Губенко<sup>1</sup>**, д-р техн. наук, проф. кафедры, e-mail: sigubenko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5427-1154>

**Э.В. Парусов<sup>2</sup>**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., зав. отделом, e-mail: tometal@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4560-2043>

**О.В. Парусов<sup>2</sup>**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: termet@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-9879-6179>

**И.Н. Чуйко<sup>2</sup>**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: ferrosplav@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4753-614X>

<sup>1</sup>Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр, Украина

<sup>2</sup>Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины, г. Днепр, Украина

## **Особенности влияния неметаллических включений на механические свойства и малоцикловую долговечность стальных канатов при эксплуатации в агрессивных средах**

*Установлено влияние неметаллических включений на механические свойства и малоцикловую долговечность стали С72D (EN 16120-2:2011) в агрессивных средах. Установлен и обоснован последовательный убывающий ряд неметаллический включений, который характеризует степень их вредного влияния на зарождение и развитие коррозионных повреждений проволок наружного слоя стального каната из стали С72D. Обосновано самое вредное влияние сульфидных и гетерофазных включений на зарождение и развитие коррозионных повреждений в процессе эксплуатации стальных канатов в различных средах.*

**Ключевые слова:** неметаллические включения, стальной канат, высокоуглеродистая сталь, малоцикловая долговечность, механические свойства.

**Актуальность и состояние вопроса исследования.** Стальные канаты подъемно-транспортных устройств зачастую эксплуатируются в сложных условиях высоких нагрузок, которые вызывают накопление напряжений и усталостных трещин, а взаимодействие металла с окружающей средой и агрессивными компонентами приводит к появлению коррозионных повреждений.

Известно, что в процессе хранения, транспортировки и эксплуатации канатов происходит физико-химическое взаимодействие наружных проволок каната с окружающей средой, что вызывает их коррозию [1–3]. Это может приводить к ухудшению функциональных характеристик и, следовательно, снижению надежности и долговечности стальных канатов. После изготовления канаты могут храниться в складских помещениях, в морских и речных портах, перевозиться различными видами транспорта в течение продолжительного времени – от нескольких недель до двух и более месяцев. На развитие коррозионных повреждений наружных проволок каната влияют следующие показатели: характер окружающей среды, влажность, химический состав стали, наличие агрессивных компонентов, температура и т. д. Влияние агрессивных компонентов на коррозию зависит от их концентрации в атмосфере, влажности воздуха, увлажнения поверхности металла, его коррозионной стойкости и от мер, которые были предприняты для защиты поверхности стального каната.

На скорость атмосферной коррозии канатов значительное влияние также оказывают резкие колебания температур [1–3]. Повышение коррозионной агрессивности при переходе от отрицательных температур к положительным объясняется повышением скорости электрохимических процессов и связано с

фазовым переходом влаги на поверхности металла из твердого агрегатного состояния в жидкое [1–3].

К специфическим условиям эксплуатации стальных канатов можно отнести: нагрузки с большими амплитудами колебаний и большим коэффициентом динамичности, высокую степень коррозионного воздействия окружающей среды, контакт с абразивной средой, не всегда выдержанное соотношение диаметров опорных поверхностей к диаметру каната. Перечисленные условия работы снижают срок службы канатов в процессе эксплуатации подъемно-транспортных механизмов.

Полнота представлений о влиянии различных факторов на структурные и фазовые превращения в канатной стали при эксплуатации, хранении и транспортировке в различных условиях – необходимое условие для разработки эффективных методов и средств обеспечения высокого уровня надежности и долговечности стальных канатов подъемно-транспортных устройств. Однако механизмы таких изменений в результате воздействия нагрузок совместно с физико-химическими процессами взаимодействия с агрессивными компонентами окружающей среды изучены недостаточно.

**Цель работы** – установить влияние неметаллических включений на изменение механических свойств и малоцикловую долговечность стальных канатов из стали С72D при эксплуатации в агрессивных средах.

**Материал и методика исследований.** В качестве материала использована проволока третьего (наружного) слоя диаметром 2,20 мм каната ЛК-РО Ø 39,0 мм конструкции 6×36(1+7+7/7+14)+7×7(1+6) из стали С72D (EN 16120-2:2011) следующего химического состава (в %): 0,73 – С; 0,68 – Mn; 0,22 – Si;

0,012 – P; 0,009 – S; 0,03 – Ni; 0,04 – Cr; 0,07 – Cu; 0,004 – N. Образцы проволоки отбирали от канатов после эксплуатации. Используемое оборудование: световой оптический микроскоп «Neophot-32»; растровый электронный микроскоп «VEGA TS5130MM», оборудованный энергодисперсионным спектрометром «INCA ENERGY-300». При проведении исследований использовали ускоренные методы коррозионных испытаний, которые позволяют за короткое время вызвать очевидное разрушение специально полученных в лабораторных условиях программно загрязненных включениями плавки стали С72D: плавка № 1 – сульфиды: (Fe, Mn)S, FeS-MnS, плавка № 2 – корунд и шпинели:  $Al_2O_3$ ,  $MgO \cdot Al_2O_3$ ,  $MnO \cdot Al_2O_3$ , плавка № 3 – силикаты:  $SiO_2$ ,  $MnO \cdot SiO_2$ ,  $FeO \cdot SiO_2$ . Испытания на малоцикловую усталость проводили на воздухе и в коррозионных средах: 5 %-ый водный раствор NaCl (среда № 1), 1 %-ный водный раствор  $H_2SO_4$  (среда № 2). Выбор коррозионных сред обусловлен тем, что они наиболее близко имитировали среды, в которых эксплуатируются стальные канаты. Ускоренные испытания склонности стали С72D к коррозионному растрескиванию выполняли на установке «ИМ-12» по ISO 7384:2001 «Методы коррозионных испытаний». Усталостную прочность определяли по ГОСТ 25.502-79 «Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость» на машине типа «НУ» при базе  $N = 3 \cdot 10^6$  циклов нагружений.

#### Результаты исследований и их обсуждение.

В изношенной проволоке из стали С72D в зонах коррозионного разрушения наблюдаются скопления неметаллических включений. Микрорентгеноспектральный анализ неметаллических включений показал, что основными химико-минералогическими их типами являются: оксиды алюминия (корунд, шпинели), сульфиды (Fe, Mn)S, FeS-MnS, силикаты различного типа ( $SiO_2$ ,  $MnO \cdot SiO_2$ ,  $FeO \cdot SiO_2$ , железо-марганцево-силикатные стекла), гетерофазные включения сложного состава (оксисиликаты с частицами карбида кремния, оксидов,  $CaF_2$ ,  $nMeO \cdot mAl_2O_3 \cdot kCaF_2$  к  $SiO_2$ , где в оксиде MeO как в твердом растворе может быть несколько элементов, таких как Fe, Mg, Ca, Mn, а также оксисульфосиликаты).

С целью изучения причин коррозионного разрушения стали С72D были получены программно загрязненные неметаллическими включениями опытные плавки по методике, изложенной в работах [4–6]: плавка № 1 с сульфидными (Fe, Mn)S, FeS-MnS; плавка № 2 с включениями корунда и шпинели  $Al_2O_3$ ,  $MgO \cdot Al_2O_3$ ,  $MnO \cdot Al_2O_3$ ; плавка № 3 с силикатами  $SiO_2$ ,  $MnO \cdot SiO_2$ ,  $FeO \cdot SiO_2$ . Вследствие методических трудностей не представлялось возможным получить опытную плавку, программно загрязненную гетерофазными включениями сложного состава (оксисиликаты и оксисульфосиликаты), однако во всех трех опытных плавках отдельно наблюдали за этими включениями, которые присутствуют в исследуемой стали.

После испытаний в активных средах вблизи различных видов включений в стали С72D наблюдается зарождение коррозионных повреждений (рисунок, а–в), которые наблюдались ранее авторами насто-

ящей работы в сталях ШХ15 и ШХ15СГ (рисунок, г) [7]. При испытаниях на малоцикловую усталость на воздухе лабораторных плавки стали С72D четко прослеживается влияние вида включений на усталостные характеристики (табл. 1): самое низкое значение величины  $N$  получено для стали, загрязненной сульфидными включениями (плавка № 1), затем значение  $N$  повышается при наличии корунда и шпинелей (плавка № 2), и, наконец, самое высокое значение величины  $N$  получено в случае силикатов (плавка № 3).

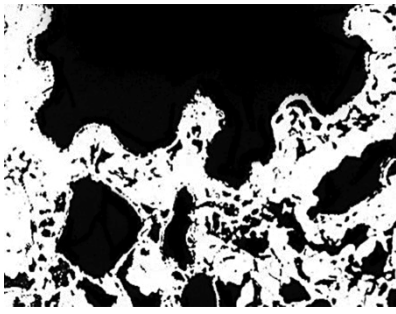
Коррозионная среда приводит к существенному снижению долговечности сталей при малоцикловой усталости, причем вид включений оказывает существенное влияние на этот показатель: по мере увеличения долговечности при малоцикловой усталости опытные плавки стали С72D выстроились в аналогичный возрастающий ряд [7]: самое низкое значение показателя  $N$  у стали плавки № 1, затем оно повышается для плавки № 2, и максимальное значение фиксируется для плавки № 3.

Коэффициент влияния среды ( $\beta_c$ ) представляет собой отношение долговечности стали на воздухе к аналогичному показателю в коррозионной среде. Чем больше значение этого коэффициента, тем сильнее снижают неметаллические включения малоцикловую долговечность стали. Результаты исследований позволили расположить виды включений в убывающий ряд, который характеризует степень их вредного воздействия на зарождение и развитие коррозионных повреждений стали С72D: оксисульфосиликаты, сульфиды (Fe, Mn)S, FeS-MnS → корунд и шпинели  $Al_2O_3$ ,  $MgO \cdot Al_2O_3$ ,  $MnO \cdot Al_2O_3$  → оксисиликаты, силикаты  $SiO_2$ ,  $MnO \cdot SiO_2$ ,  $FeO \cdot SiO_2$ . Необходимо отметить, что аналогичная зависимость (с учетом некоторых различий в химико-минералогическом составе аналогичных видов включений) была получена авторами для сталей ШХ15 и ШХ15СГ [7], а также для колесной стали и стали типа 08 [4–6]. Однако в регрессном ряде для указанных сталей на

Таблица 1

Малоцикловая долговечность ( $N$ ) стали С72D в различных средах и коэффициент влияния среды  $\beta_c$  в зависимости от вида включений

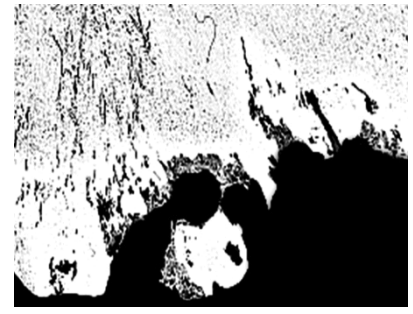
Среда	Номер плавки; включения	$N \cdot 10^6$	$\beta_c$
Воздух	№ 1; (Fe, Mn)S, FeS-MnS	1,6	–
	№ 2; $Al_2O_3$ , $MgO \cdot Al_2O_3$ , $MnO \cdot Al_2O_3$	2,0	–
	№ 3; $SiO_2$ , $MnO \cdot SiO_2$ , $FeO \cdot SiO_2$	2,2	–
5 %-ный водный раствор NaCl	№ 1; (Fe, Mn)S, FeS-MnS	0,9	1,77
	№ 2; $Al_2O_3$ , $MgO \cdot Al_2O_3$ , $MnO \cdot Al_2O_3$	1,4	1,42
	№ 3; $SiO_2$ , $MnO \cdot SiO_2$ , $FeO \cdot SiO_2$	1,5	1,46
1 %-ный водный раствор $H_2SO_4$	№ 1; (Fe, Mn)S, FeS-MnS	0,6	2,66
	№ 2; $Al_2O_3$ , $MgO \cdot Al_2O_3$ , $MnO \cdot Al_2O_3$	1,3	1,54
	№ 3; $SiO_2$ , $MnO \cdot SiO_2$ , $FeO \cdot SiO_2$	1,4	1,57



а



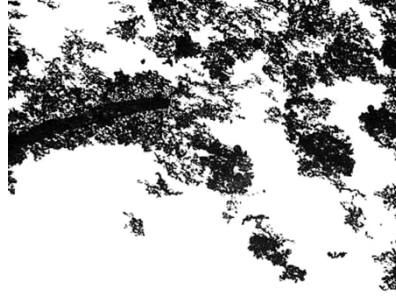
б



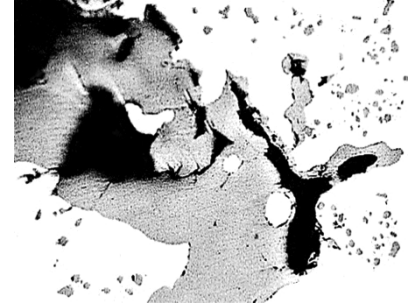
в



г



д



е

Коррозионное разрушение сталей ( $\times 600$ ): а – изношенная канатная проволока из стали С72D; б, в, д, е – опытные плавки стали С72D; г – сталь ШХ15 [7]; б, г, е – 5 %-ный водный раствор NaCl; в, д – 1 %-ный водный раствор  $H_2SO_4$

последнем месте по вредному влиянию на коррозию был карбонитрид титана (TiCN), который отсутствует в стали С72D. В то же время, необходимо объяснить появление в убывающем ряду гетерофазных включений, присутствующих в стали С72D.

Гетерофазные включения сложного состава, присутствующие в опытных плавках, также являлись центрами зарождения коррозионных повреждений (рисунок, д, е). Степень вредного влияния на образование очагов коррозии следует рассматривать с учетом структуры таких включений. Неметаллические включения, обозначенные выше как оксисиликаты, представляют собой силикатную «матрицу» включения, в которой находятся частицы оксидов  $CaF_2$ ,  $nMeO \cdot mAl_2O_3 \cdot CaF_2 \cdot kSiO_2$  – это так называемые гетерофазные включения четвертого типа «дисперсные фазы в неметаллической матрице» [4, 5, 8]. Либо эти включения содержат частицы фаз оксидов  $CaF_2$ ,  $nMeO \cdot mAl_2O_3 \cdot CaF_2 \cdot kSiO_2$ , окруженных силикатной оболочкой, – это так называемые гетерофазные включения первого типа «тугоплавкая фаза, окруженная легкоплавкой оболочкой» [4–6]. Поэтому гетерофазные включения оксисиликатов, которые имеют базовую силикатную фазу, оказывают влияние на зарождение коррозионных повреждений подобно силикатным включениям более простого состава ( $SiO_2$ ,  $MnO \cdot SiO_2$ ,  $FeO \cdot SiO_2$ ) и их можно добавить в убывающий ряд вместе с ними. В то же время, присутствие частиц других фаз во включениях оксисиликатов должно оказывать стимулирующее влияние на зарождение коррозионных повреждений из-за наличия внутренних межфазных границ во включениях, которые являются «каналами» для развития адсорбционных и коррозионных процессов [4–6]. Именно по этой причине гетерофазные оксисиликатные включения указаны первыми в убывающем ряду среди силикатов.

Что касается гетерофазных включений, классифицируемых как оксисульфосиликаты, – как правило, сульфидная фаза образует оболочку вокруг частиц оксидов и силикатов, поэтому их можно отнести к так называемым гетерофазным включениям первого типа «тугоплавкая фаза, окруженная легкоплавкой оболочкой» [4–6]. Поэтому гетерофазные включения оксисульфосиликатов, имеющие сульфидную оболочку, оказывают влияние на зарождение коррозионных повреждений подобно сульфидным включениям более простого состава (Fe, Mn)S, FeS-MnS и их можно добавить в убывающий ряд вместе с ними. Присутствие частиц оксидных и силикатных фаз во включениях оксисульфосиликатов должно оказывать стимулирующее влияние на зарождение коррозионных повреждений из-за наличия внутренних межфазных границ во включениях, которые, как и в случае оксисиликатов, являются «каналами» для развития адсорбционных и коррозионных процессов [4–6]. Именно поэтому гетерофазные оксисульфосиликатные включения указаны первыми в убывающем ряду среди сульфидов.

Включения в стальной матрице вызывают появление коррозионных микроэлементов, что усиливает степень электрохимической микрогетерогенности поверхности металла. Известно, что неметаллические включения являются катодами по отношению к стальной матрице [9]. Опытным путем для разных типов сталей установлено, что по величине значений разностей электродных потенциалов  $\Delta\varphi$ , они располагаются в убывающий ряд: сульфиды (Fe, Mn)S, FeS-MnS, корунд и шпинели  $Al_2O_3$ ,  $MgO \cdot Al_2O_3$ ,  $MnO \cdot Al_2O_3$ ,  $(Mn, Mg)O \cdot Cr_2O_3$ , силикаты  $SiO_2$ ,  $MnO \cdot SiO_2$ ,  $FeO \cdot SiO_2$ , карбонитрид титана TiCN [4–6]. В таком же порядке, но в возрастающий ряд, располагаются включения по величине удельного электросопротивления [4–6]. Металлографические

**Механические свойства стали С72D с разными видами включений после испытаний на растяжение в различных средах**

Среда	Номер плавки; вид включения	Свойства			
		$S_k$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_{10}$ , %	$\psi$ , %
Воздух	№ 1; (Fe, Mn)S, FeS-MnS	1089	1110	11,5	28,4
	№ 2; $Al_2O_3$ , $MgO \cdot Al_2O_3$ , $MnO \cdot Al_2O_3$	1067	1056	10,1	27,2
	№ 3; $SiO_2$ , $MnO \cdot SiO_2$ , $FeO \cdot SiO_2$	1092	1078	10,6	28,7
5%-ный водный раствор NaCl	№ 1; (Fe, Mn)S, FeS-MnS	984	1062	9,1	25,6
	№ 2; $Al_2O_3$ , $MgO \cdot Al_2O_3$ , $MnO \cdot Al_2O_3$	1049	1043	9,5	26,6
	№ 3; $SiO_2$ , $MnO \cdot SiO_2$ , $FeO \cdot SiO_2$	1049	1071	9,8	26,1
1%-ный водный раствор $H_2SO_4$	№ 1; (Fe, Mn)S, FeS-MnS	934	1012	7,8	22,4
	№ 2; $Al_2O_3$ , $MgO \cdot Al_2O_3$ , $MnO \cdot Al_2O_3$	956	1021	8,4	23,9
	№ 3; $SiO_2$ , $MnO \cdot SiO_2$ , $FeO \cdot SiO_2$	1002	1039	8,6	25,5

исследования сталей опытных плавок после испытаний на малоцикловую усталость в различных средах показали, что коррозионные повреждения зарождались на включениях всех видов. Практически всегда развитие коррозии начинается на межфазных границах включение-матрица, а затем распространяется в стальную матрицу и включение. Межфазные границы включение-матрица, а также внутренние межфазные границы в гетерофазных включениях, являются готовыми «каналами» для проникновения атомов поверхностно активного вещества из окружающей среды [4–6].

Результаты исследований (см. табл. 1) позволили условно разделить неметаллические включения в стали С72D на две группы. В первую группу входят сульфидные включения (Fe, Mn)S, FeS-MnS, для которых коэффициент влияния среды  $\beta_c$  в 5 %-ом водном растворе NaCl составляет 1,77, а в 1 %-ом водном растворе  $H_2SO_4$  – 2,66. Во вторую группу входят все остальные включения, а именно корунд и шпинели  $Al_2O_3$ ,  $MgO \cdot Al_2O_3$ ,  $MnO \cdot Al_2O_3$ , силикаты  $SiO_2$ ,  $MnO \cdot SiO_2$ ,  $FeO \cdot SiO_2$ , для которых величина  $\beta_c$  в среде 5 %-ого водного раствора NaCl составляет 1,42–1,46, а в среде 1 %-ого водного раствора  $H_2SO_4$  – 1,54–1,57. Для разных видов включений существуют такие равные условия, как их содержание в стали, наличие межфазных границ включение-матрица, протекание адсорбционных процессов, а также различия в электропроводности и полупроводниковых свойствах включений, определяющие установленную выше последовательность степеней вредного влияния включений на зарождение коррозии. В то же время следует учитывать фактор, связанный с наличием термических напряжений, причем напряжений определенного знака вблизи включений [4–6, 10]. В работе [3] показано влияние сжимающих напряжений на подавление адсорбционного эффекта, в то же время остаточные растягивающие напряжения усиливают адсорбционные и коррозионные усталостные явления, то есть, суммируясь с действующими (внешними) циклическими растягивающими напряжениями, растягивающие напряжения вблизи включений значительно повышают число «активных» ультрамикротрещин в стали. Расчеты и исследования термических напряжений показали [4–6], что только вблизи сульфидов они являются растягивающими, вблизи остальных изучаемых в данной работе включений – сжимающими.

Поскольку разрушение сталей вследствие коррозионного растрескивания наиболее опасно, так как оно происходит внезапно (без заметной пластической деформации), были проведены исследования по влиянию неметаллических включений на механические свойства опытных плавок стали С72D в активных средах. Скоростные испытания с целью определения склонности к коррозионному растрескиванию показали, что механические свойства стали С72D зависели от вида включений при испытаниях на воздухе (табл. 2).

Испытания в коррозионных средах привели к перераспределению относительного влияния вида включений на механические свойства стали. Временное

сопротивление разрыву ( $\sigma_B$ ), сопротивление отрыву ( $S_k$ ), характеристики пластичности ( $\delta$ ;  $\psi$ ) наиболее существенно уменьшились для плавки № 1 с сульфидами, для плавок с другими видами включений это снижение являлось менее значительным. При этом четко прослеживается убывающий ряд по влиянию вида включений на механические свойства стали (с учетом присутствия гетерофазных включений): оксисульфосиликаты, сульфиды (Fe, Mn)S, FeS-MnS → корунд и шпинели  $Al_2O_3$ ,  $MgO \cdot Al_2O_3$ ,  $MnO \cdot Al_2O_3$  → оксисиликаты, силикаты  $SiO_2$ ,  $MnO \cdot SiO_2$ ,  $FeO \cdot SiO_2$ , что соответствует результатам, приведенным выше, при оценке влияния включений на долговечность стали С72D при малоцикловой усталости.

Известно, что основным критерием влияния окружающей среды на усталостную прочность сталей служит предел усталости, определяемый в различных средах. В качестве показателя, характеризующего влияние среды, принят коэффициент циклической прочности  $\beta$  (табл. 3), представляющий собой отношение предела усталости, определенного при испытаниях в коррозионной среде, к пределу усталости, полученному при испытаниях на воздухе. При испытаниях на воздухе величина предела усталости стали С72D определяется видом включений (при одинаковом их содержании в плавке): самый высокий предел усталости у плавки с сульфидами, затем он снижается у плавки с силикатами и самое низкое значение  $\sigma_{-1}$  имеет плавка, содержащая оксидные включения.

Таблица 3

Значения предела усталости ( $\sigma_{-1}$ ) и коэффициента циклической прочности ( $\beta$ ) стали С72D с различными видами включений

Среда	Номер плавки; вид включения	Показатели циклической прочности	
		$\sigma_{-1}$ , МПа	$\beta$
Воздух	№ 1; (Fe, Mn)S, FeS-MnS	489	1
	№ 2; $Al_2O_3$ , $MgO \cdot Al_2O_3$ , $MnO \cdot Al_2O_3$	347	1
	№ 3; $SiO_2$ , $MnO \cdot SiO_2$ , $FeO \cdot SiO_2$	476	1
5%-ный водный раствор NaCl	№ 1; (Fe, Mn)S, FeS-MnS	392	0,80
	№ 2; $Al_2O_3$ , $MgO \cdot Al_2O_3$ , $MnO \cdot Al_2O_3$	319	0,92
	№ 3; $SiO_2$ , $MnO \cdot SiO_2$ , $FeO \cdot SiO_2$	423	0,89
1%-ный водный раствор $H_2SO_4$	№ 1; (Fe, Mn)S, FeS-MnS	327	0,67
	№ 2; $Al_2O_3$ , $MgO \cdot Al_2O_3$ , $MnO \cdot Al_2O_3$	294	0,85
	№ 3; $SiO_2$ , $MnO \cdot SiO_2$ , $FeO \cdot SiO_2$	447	0,94

Для воздушной атмосферы величина коэффициента циклической прочности  $\beta$  для всех плавок равна 1.

Испытания в коррозионных средах привели к уменьшению величины предела усталости стали опытных плавок. При испытаниях в 5 %-ом водном растворе NaCl наиболее сильное снижение предела усталости наблюдается у плавки с сульфидными включениями, которые оказывают наиболее значимое воздействие по вредному влиянию коррозионной среды на уменьшение предела усталости исследуемой стали. Результаты исследований подтверждаются изменением значений коэффициента циклической прочности ( $\beta$ ) стали С72D с различными видами включений (см. табл. 3). Следовательно, произошло перераспределение неметаллических включений по

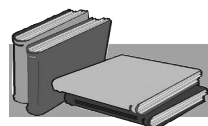
степени их вредного влияния на усталость стали, поскольку прослеживается следующая тенденция к образованию убывающего ряда по степени влияния включения на предел усталости стали С72D (с учетом гетерофазных включений): оксисульфосиликаты, сульфиды (Fe, Mn)S, FeS-MnS  $\rightarrow$  корунд и шпинели ( $Al_2O_3$ ,  $MgO \cdot Al_2O_3$ ,  $MnO \cdot Al_2O_3$ )  $\rightarrow$  оксисиликаты, силикаты  $SiO_2$ ,  $MnO \cdot SiO_2$ ,  $FeO \cdot SiO_2$ . Указанные закономерности еще более ярко выражены при испытаниях в 1 %-ом водном растворе  $H_2SO_4$ .

Таким образом, по результатам испытаний стали С72D на усталостную прочность в коррозионных средах следует выделить наиболее сильное влияние сульфидных включений, что согласуется с результатами, полученными при оценке влияния неметаллических включений на долговечность некоторых других сталей при малоциклового усталости [4–6, 11].

## Выводы

Исследована и показана активная роль неметаллических включений в развитии усталостно-коррозионного износа стали С72D. Коррозионная активность неметаллических включений в стали С72D определяется знаком термических напряжений, а также существенной ролью межфазных границ включение-матрица и внутренних межфазных границ в гетерофазных включениях.

Установлено влияние неметаллических включений на механические свойства и малоцикловую долговечность в активных средах стали С72D. Установлен последовательный убывающий ряд, демонстрирующий степень вредного влияния включений на зарождение и развитие коррозионных повреждений в стали С72D: оксисульфосиликаты, сульфиды (Fe, Mn)S, FeS-MnS  $\rightarrow$  корунд и шпинели ( $Al_2O_3$ ,  $MgO \cdot Al_2O_3$ ,  $MnO \cdot Al_2O_3$ )  $\rightarrow$  оксисиликаты, силикаты  $SiO_2$ ,  $MnO \cdot SiO_2$ ,  $FeO \cdot SiO_2$ . Обосновано наиболее вредное влияние сульфидных и гетерофазных включений на зарождение и развитие коррозионных повреждений в процессе эксплуатации стальных канатов в различных средах.

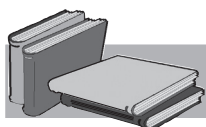


## ЛИТЕРАТУРА

1. Карпенко Г.В., Василенко И.И. Коррозионное растрескивание сталей. – Киев: Техника, 1971. – 191 с.
2. Карпенко Г.В. Прочность стали в коррозионной среде. – Москва: МАНГИЗ, 1963. – 187 с.
3. Лихтман В.И., Щукин Е.Д., Ребиндер П.А. Физико-химическая механика материалов. – Москва: АН СССР, 1962. – 303 с.
4. Губенко С.И., Ошкадеров С.П. Неметаллические включения в стали. – Киев: Наукова думка, 2016. – 528 с.
5. Губенко С.И. Неметаллические включения и прочность сталей. Физические основы прочности сталей. – Германия, Саарбрюкен (Saarbrücken): LAP LAMBERT. Palmarium academic publishing, 2015. – 476 с.
6. Губенко С.И. Межфазные границы включение-матрица в сталях. Межфазные границы неметаллическое включение-матрица и свойства сталей. – Германия, Germany-Mauritius: Beau Bassin. Palmarium academic publishing, 2017. – 506 с.
7. Gubenko S.I., Sychkov A.B., Parusov E.V., Denisenko A.I., Zavalishchin A.N. Corrosive damage close to nonmetallic inclusions in bearing steels // *Steel in Translation*. – 2018. – Vol. 48. – № 3. – С. 197–201.
8. Губенко С.И. Возможности трансформации неметаллических включений и межфазных границ включение-матрица при высокоэнергетических обработках сталей // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2014. – № 3 (36). – С. 287–315.
9. Куслицкий А.Б. Неметаллические включения и усталость стали. – Киев: Техника, 1976. – 128 с.

10. Gubenko S.I., Galkin A.M. On the nature of red brittleness of steel // *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov.* – 1984. – № 10. – С. 11–15.
11. Губенко С.И., Иванов И.А., Кононов Д.П. Влияние качества стали на усталостную прочность цельнокатаных колес // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* – 2018. – № 3 (84). – С. 52–60.

Поступила 29.10.2018



## REFERENCES

1. Karpenko, G.V., Vasilenko, I.I. (1971). Steel corrosion cracking. Kyiv: Tekhnika, 191 p. [in Russian].
2. Karpenko, G.V. (1963). Steel strength in corrosive environment. Moscow: MASHGIZ, 187 p. [in Russian].
3. Likhtman, V.I., Shchukin, E.D., Rebinder, P.A. (1962). Physico-chemical mechanics of materials. Moscow: AN SSSR, 303 p. [in Russian].
4. Gubenko, S.I., Oshkaderov, S.P. (2016). Non-metallic inclusions in steel. Kyiv: Naukova dumka, 528 p. [in Russian].
5. Gubenko, S.I. (2015). Non-metallic inclusions and strength of steel. Physical basis of the strength of steel. Germany, (Saarbrücken): LAP LAMBERT. Palmarium academic publishing, 476 p. [in Russian].
6. Gubenko, S.I. (2017). Interphase boundaries inclusion matrix in steels. Interphase boundaries non-metallic inclusion matrix and properties of steels. Germany, Germany-Mauritius: Beau Bassin. Palmarium academic publishing, 506 p. [in Russian].
7. Gubenko, S.I., Sychkov, A.B., Parusov, E.V., Denisenko, A.I., Zavalishchin, A.N. (2018). Corrosive damage close to nonmetallic inclusions in bearing steels. *Steel in Translation*, Vol. 48, no. 3, pp. 197–201 [in English].
8. Gubenko, S.I. (2014). The possibilities of transformation of non-metallic inclusions and interphase boundaries of the inclusion-matrix during high-energy treatments of steels. *Metallofizika i noveishie tekhnologii*, no. 3 (36), pp. 287–315 [in Russian].
9. Kuslitskii, A.B. (1976). Non-metallic inclusions and steel fatigue. Kyiv: Tekhnika, 128 p. [in Russian].
10. Gubenko, S.I., Galkin, A.M. (1984). On the nature of red brittleness of steel. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov*, no. 10, pp. 11–15 [in English].
11. Gubenko, S.I., Ivanov, I.A., Kononov, D.P. (2018). Effect of steel quality on the fatigue strength of solid wheels. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, no. 3 (84), pp. 52–60 [in Russian].

Received 29.10.2018

### Анотація

**С.І. Губенко**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф. кафедри, e-mail: sigubenko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5427-1154>; **Е.В. Парусов**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, ст. наук. співр., зав. відділу, e-mail: tometal@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4560-2043>; **О.В. Парусов**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: termet@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-9879-6179>; **І.М. Чуйко**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: ferrosplav@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4753-614X>

<sup>1</sup>Національна металургійна академія України, м. Дніпро, Україна

<sup>2</sup>Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро, Україна

## Особенности влияния неметаллических включений на механические свойства та малоцикловую долговечность стальных канатов при эксплуатации в агрессивных средах

Встановлено вплив неметаллических включений на механические свойства та малоцикловую долговечность стали С72D (EN 16120-2:2011) в агрессивных средах. Встановлено і обґрунтовано послідовний спадний ряд неметаллических включений, який характеризує ступінь їх шкідливого впливу на зародження і розвиток корозійних пошкоджень дратів зовнішнього шару сталевих канатів зі сталі С72D. Обґрунтовано найшкідливіший вплив сульфідних і гетерофазних включень на зародження і розвиток корозійних пошкоджень в процесі експлуатації сталевих канатів в різних середовищах.

### Ключові слова

Неметалеві включення, сталевий канат, високовуглецева сталь, малоциклова довговічність, механічні властивості.

## Summary

**S.I. Gubenko**<sup>1</sup>, Doctor of Engineering Sciences, Professor at the Department, e-mail: sigubenko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5427-1154>; **E.V. Parusov**<sup>2</sup>, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, Head of the Department, e-mail: tometal@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4560-2043>; **O.V. Parusov**<sup>2</sup>, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, e-mail: termet@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-9879-6179>; **I.N. Chuiko**<sup>2</sup>, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, e-mail: ferrosplav@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4753-614X>

<sup>1</sup>*The National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine*

<sup>2</sup>*Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine*

## Specifics of the effect of non-metallic inclusions on mechanical properties and low-cyclic durability of steel ropes during operation in aggressive environment

*The influence of non-metallic inclusions on the mechanical properties and low-cycle durability of steel C72D (EN 16120-2:2011) in corrosive environments has been established. A consistent decreasing series of non-metallic inclusions is established and substantiated, which characterizes the degree of their harmful influence on the nucleation and development of corrosion damage to the wires of the outer layer of steel ropes made of steel C72D. The most harmful effect of sulphide and heterophase inclusions on the nucleation and development of corrosion damage during the operation of steel ropes cables in various environments has been substantiated.*

## Keywords

*Non-metallic inclusions, steel rope, high carbon steel, low-cycle durability, mechanical properties.*