

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА РАЗРУШЕНИЕ ГИЛЬЗ КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ СОРТОВЫХ МНЛЗ

И.В.Лейрих (ДонНТУ, г. Донецк), Е. Ю. Жибоедов (ОАО «ЕМЗ», г. Енакиево)

Для кристаллизаторов сортовой высокоскоростной МНЛЗ с различным покрытием и конусностью, рассмотрены причины преждевременного снятия из эксплуатации и разрушения. Показано, что случаи низкой стойкости связаны с нарушениями технологии литья и небрежностью персонала. Высокая стойкость способствует повреждениям износогового типа и термоусталостным. В обычных условиях эксплуатации стойкость определяется конструкцией гильзы, в первую очередь покрытием. Геометрия профиля оказывает меньшее влияние. Наибольшую стойкость показали гильзы с трехслойным покрытием. Предложена классификация эксплуатационных дефектов и повреждения гильз.

Заливаемая сталь оказывает на кристаллизатор машины непрерывного литья интенсивное тепловое и механическое воздействие. Постепенно геометрия его внутренней рабочей поверхности изменяется, ухудшается качество непрерывно-литой заготовки и после определенного числа плавов гильзу выводят из эксплуатации. Причины выхода гильзы из строя могут быть различными и зависеть от ряда факторов. Например, для слябовых МНЛЗ (сечение заготовки 175x1020 мм) выделяют следующие причины выхода из строя кристаллизаторов: истирание меди, трещины на рабочей поверхности медных облицовок, коробление кристаллизаторов и случайные причины, связанные с небрежностью персонала [1]. Авторы отмечают значительное истирание меди в нижней части слябового кристаллизатора; при переходе к квадратной заготовке в первую очередь изнашивалось покрытие в углах гильзы.

Аналогично, в работе [2] основным видом разрушения слябового кристаллизатора 250x1500 мм полагают износ в нижней части широкой стенки в местах, наиболее удаленных от углов.

Кристаллизаторы сортовых МНЛЗ принципиально отличаются от слябовых геометрией, условиями охлаждения, скоростями разливки, что изменяет деформационно-напряженное состояние и влияет на характер разрушения покрытия и основного материала гильзы.

Влияние износа на разрушение гильз сортовых кристаллизаторов также весьма существенно. Характер и интенсивность износа, деформация

поверхности в сортовых кристаллизаторах существенно зависят от конструкции гильзы и условий ее охлаждения. Промышленные испытания гильз («квадрат 125 мм») с однослойным хромовым и трехслойным покрытиями показали, что совершенствованием технологии нанесения покрытия, выбором профиля и конусности гильзы, улучшением охлаждения можно снизить термические деформации гильзы в зоне мениска и уменьшить истирание покрытия [3]. Авторы предлагают усовершенствованную конструкцию гильзы, которая позволила сохранить устойчивую конусность в верхней части гильзы при минимальном износе в верхней части и интенсивном износе только в нижней части гильзы.

Необходимо отметить, что скорость разливки в указанной работе составляла 1,9-2,5 м/мин. Полученная стойкость изменялась от 241-361 (трехслойное покрытие) до 247-465 плавов (однослойное хромовое покрытие ВНИИМЕТМАШ и опытная конструкция гильзы).

Повышение скорости разливки интенсифицирует тепловой поток и увеличивает деформацию профиля гильзы. В этих условиях не только ускоряются процессы износа, но и могут проявляться дефекты изготовления гильзы, нанесения покрытия, которые не обнаруживаются при более низких скоростях разливки. Исследование и обобщение данных по разрушению кристаллизаторов в условиях интенсивной эксплуатации позволит выбрать оптимальные технологии их изготовления, а также выявить факторы, влияющие на разрушение, что позволит повысить производительность машин непрерывного литья.

В работе исследовали повреждаемость гильз кристаллизаторов сортовой МНЛЗ при литье в промышленных условиях заготовок «квадрат 100 – квадрат 150 мм». Большинство параметров непрерывного литья (марка стали, температура разливки, расход охлаждающей воды и пр.) изменялись во всех исследованных плавках незначительно. Скорость разливки для гильз сечением «квадрат 120 мм» составляла не менее 3,7 м/мин, в отдельных плавках была 4,5 и более м/мин.

Было опробовано несколько типов гильз кристаллизаторов с различной геометрией рабочей полости. По форме профиля гильзы разделили на три группы:

- 1) гильзы с многоступенчатой параболической конусностью производства фирм «КМЕ» и «ЕМ»;
- 2) гильзы производства АХК «ВНИИМЕТМАШ», в которых используется принцип компенсации усадки выпуклой затвердевающей корочки путем ее постепенного выпрямления;
- 3) гильзы производства фирмы «Kobelco» с усовершенствованной параболической конусностью (тип профиля – «e-mould»), позволяющей минимизировать величину газового зазора между непрерывно-литой заго-

товкой и стенкой гильзы, и наружной шероховатой водоохлаждаемой поверхностью.

Некоторые технологические характеристики исследованных гильз приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Паспортные характеристики гильз

Фирма – производитель гильзы	Технические характеристики гильз				
	Материал	Конусность	Тип и толщина покрытия, мкм	Конусность, (%/м)	
				Рад. гр.	Пар. гр.
«КМЕ», Германия	Cu – Ag	параболическая	Cr (120)	0,87	0,88
«ЕМ», Италия	Cu – Ag	4-х конусная	Cr (120)	0,99	1,0
«ВНИИМЕТМАШ», Россия	Cu DHP	3-х конусная	Cr (120 – 160)	2,36	1,42
«Kobelco», Япония	Cu – Ag	параболическая (e-mould)	Cr (70)	0,89	0,88
«Kobelco», Япония	Cu – Ag	параболическая (e-mould)	Ni+P – Co – Cr (70)	0,89	0,88

Все гильзы, указанные в таблице, имели длину 1000 мм, при этом их эффективная длина составляла 876 мм, базовый радиус МНЛЗ – 7 м. Изменение геометрических размеров и коробление стенок гильз кристаллизаторов изучали при помощи измерительной системы MCS– 3000. Все гильзы были сняты из-за появления дефектов, делающих не возможной ее дальнейшую нормальную эксплуатацию. Различия в конструкции, геометрии гильз, значительные различия в стойкости позволили проследить динамику повреждаемости гильз и получить данные о различных видах повреждений кристаллизаторов.

Стойкость исследованных гильз изменялась в широких пределах (табл. 2, данные за 2005 г.).

Наименьшую стойкость показали гильзы, повреждение которых связано с ошибками в работе обслуживающего МНЛЗ персонала. Очевидно, что такие дефекты могут возникать в любом месте гильзы и не зависят от ее конструкции и фирмы–изготовителя.

Таблица 2 – Стойкость исследованных гильз

Фирма – производитель гильз (количество, шт.)	Стойкость гильз, плавов, средняя (минимум – максимум)
«КМЕ», Германия (12)	215 (16 – 351)
«ЕМ», Италия (23)	220 (97 – 460)
«ВНИИМЕТМАШ», Россия (32)	210 (61 – 420)
«Kobelco», Япония, однослойное покрытие (22)	270 (48 – 540)
«Kobelco», Япония, многослойное покрытие (6)	670 (519 – 909)

Например, заведение затравки без защитного колпака оператором МНЛЗ привело для профиля гильзы производства КМЕ к значительной (свыше 0,5 мм) деформации по радиальным граням на уровне 850 мм от верхнего торца гильзы (рис. 1, а) и гильза была снята из эксплуатации после 16 плавов. Уменьшение геометрических размеров гильзы свыше 0,1 мм с уровня от 850 мм до 1000 мм от верхнего торца гильзы – дефект «утяжка», который получается из-за поджима гильзы нижней крышкой кристаллизатора с уплотнением при большой конусности гильзы на этом участке или при жесткой ее фиксации в обечайке центрирующими винтами (рис. 1, б). Эти дефекты фиксируются только при контроле профиля измерительной системой и практически не видны при визуальном осмотре. Гильза производства «ЕМ» была выведена из эксплуатации с таким дефектом после 7 плавов как утратившая рабочий профиль.

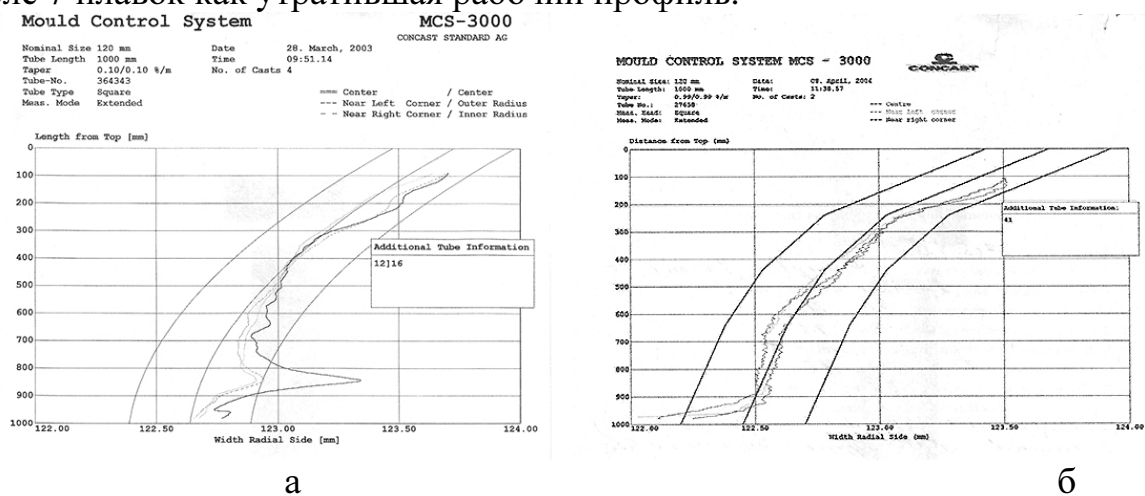


Рисунок 1 – Деформация профиля при заведении затравки без защитного колпака (а) и утяжка гильзы в нижней части (б)

В гильзах, которые показали более высокую стойкость, начинают проявляться дефекты покрытия. В этом случае повреждение развивается в зоне несколько ниже мениска, температура нагрева которой и, соответственно, температурные напряжения и деформации максимальны.

На рис. 2 показана внутренняя рабочая поверхность гильзы производства КМЕ после 123 плавов. Видно, что хромовое покрытие светлое, без видимых следов окисления, но в районе максимального термического нагружения обнаруживается ряд дефектов.

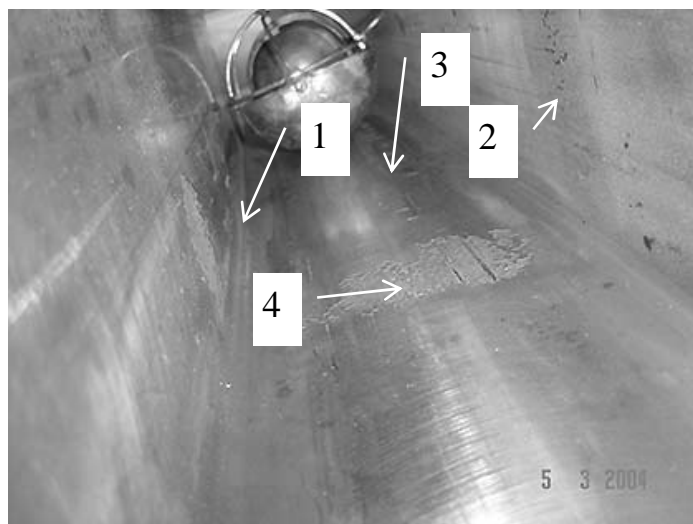


Рисунок 2 – Разрушение хромового покрытия гильзы

Угловой износ еще практически отсутствует, в покрытии появляются относительно короткие участки износа неравномерной ширины, возникающие в углах гильзы примерно на 5–7 см ниже линии мениска (поз.1). Можно отметить несимметричность появления этих участков относительно граней гильзы.

Примерно на уровне мениска и несколько ниже его сформировался ряд коротких трещин в покрытии. Видны две системы таких трещин: в первой (поз. 2) трещины идут по образующей стенки гильзы, во второй (поз. 3) – по длине гильзы. Эти трещины отличаются характером развития, но вероятной причиной их появления можно считать термические деформации стенки, величина которых различна в продольном и поперечном направлениях.

На поверхности покрытия возникают достаточно протяженные (диаметром около 50 – 60 мм) участки разрушения покрытия (поз. 4) и полосы каплевидных раковин (длиной от 5 до 10 мм, глубиной от 1 до 2 мм), вытянутые по ходу движения НЛЗ. Аналогичные участки, но в меньшем количестве, наблюдали также и в гильзах производства «ВНИИМЕТМАШ» (стойкость – 87 плавов).

В этих зонах покрытие утоняется постепенно, участками (рис. 3,а).

Границы участков сглаженные, и на дальних стадиях разрушения большая часть покрытия обнажается до медной основы, но в отдельных местах еще сохраняются фрагменты хромового покрытия. С учетом постепенного характера развития, эти участки можно трактовать как зоны эрозионного разрушения.

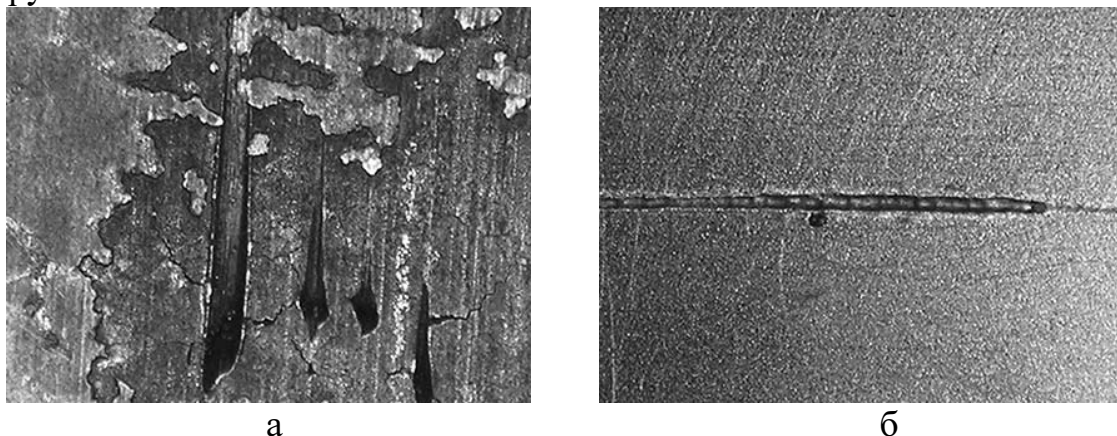


Рисунок 3 – Разрушение покрытия в участках эрозии (а) и абразивного действия поверхности заготовки

Металлографические исследования показали, что одной из причин их возникновения является недостаточная прочность сцепления хромового покрытия с медной основой [4]. Образование таких участков провоцирует зависание заготовки в кристаллизаторе, сцепление заготовки с покрытием и отрыв ее от покрытия при начале движения. Большая и неравномерная толщина покрытия вызывает образование значительных напряжений и нарушение контакта на границе раздела медь-хром, что в свою очередь, вызывает неравномерность теплоотвода и перегрев с растворением и испарением покрытия. Например, в гильзах КМЕ, в которых возникали участки эрозионного разрушения, толщина покрытия изменялась от 150 до 200 мкм (1,8 – 2,5 % от толщины медной стенки гильзы). Эти дефекты не проявлялись в гильзах с толщиной покрытия менее 100 мкм производства «Kobelco» Японии.

С участками эрозионного разрушения связаны глубокие риски, которые, как видно из рис.3,а, проходят глубоко через покрытие и основной материал гильзы. Они возникали в районе подвода струи и распространялись вниз по ходу движения заготовки. Возможная причина их появления – застывшие капли стали на поверхности заготовки, которые оказывают абразивное воздействие на поверхность кристаллизатора. При низкой прочности сцепления покрытия и меди абразивные частицы прорезают покрытие, вызывая в нем сколы, а при выходе на прочное покрытие частица отваливается или истирается и риска быстро исчезает (твердость хрома заметно выше твердости стали). Если такая частица сразу попадает на качественное покрытие, при ее движении создаются последовательные зоны

растяжения – сжатия, но хрупкого разрушения покрытия не происходит (рис. 3,б).

Эти риски заметно отличаются от относительно неглубоких (от 1 до 2 мм глубиной) и более длинных раковин и задиров, возникающих на рабочей поверхности гильзы вследствие абразивного или режущего действия клиновидными языками «поясов» непрерывно-литой заготовки, а также сбоями в работе механизма качания кристаллизатора (рис. 4, а). Как видно, в этом случае риски возникают на большем расстоянии от мениска и представляют систему большого числа параллельных линий. Приведенная на рис. 4, а гильза производства ВНИИМЕТМАШ была снята после 187 плавов, образование такого дефекта скорее связано с небрежностью персонала, чем с качеством гильзы.

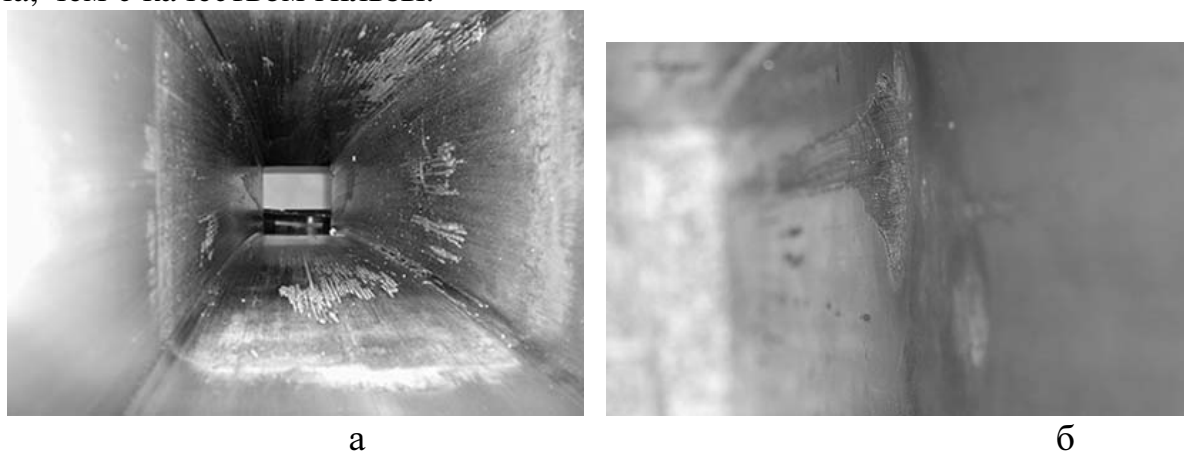


Рисунок 4 – Разрушение покрытия из-за сбоев в работе механизма качания кристаллизатора

Так же с нарушениями технологии можно связать появление глубоких раковин с рваными краями, близкие по форме к кругу (от 5 до 8 мм глубиной, в диаметре от 10 до 15 мм). Они возникали в околоугловых областях и на гранях рабочей поверхности гильзы в результате частых перековшоек промежуточными ковшами на МНЛЗ, при которых сильно охлажденный в кристаллизаторе слиток в результате своего поступательного движения вниз повреждал износостойкое покрытие в местах соприкосновения со стенками гильзы, а вместе с ним и материал гильзы (рис. 4, б, стойкость гильзы производства ЕМ 261 плавка). И в этом случае повреждение гильзы в меньшей степени связано с качеством покрытия и изготовления гильзы и требует более строгого соблюдения технологии непрерывного литья.

Явления износа (угловой, нижних граней) были выражены только при высокой стойкости гильзы. На рис. 5, а приведена поверхность многослойной гильзы производства фирмы «Kobelco», стойкость 780 плавов, с равномерным износом угловых областей. Износ на гранях не наблюдался.

В районе мениска при большом числе плавов развивалась сетка разгара, вызванная процессами термической усталости (рис. 5, б). Эти гильзы эксплуатировались без видимых нарушений технологического процесса непрерывного литья и показали ожидаемо высокую стойкость. Такие же гильзы, эксплуатировавшиеся с нарушением технологии, имели более низкую стойкость (см. табл. 2).

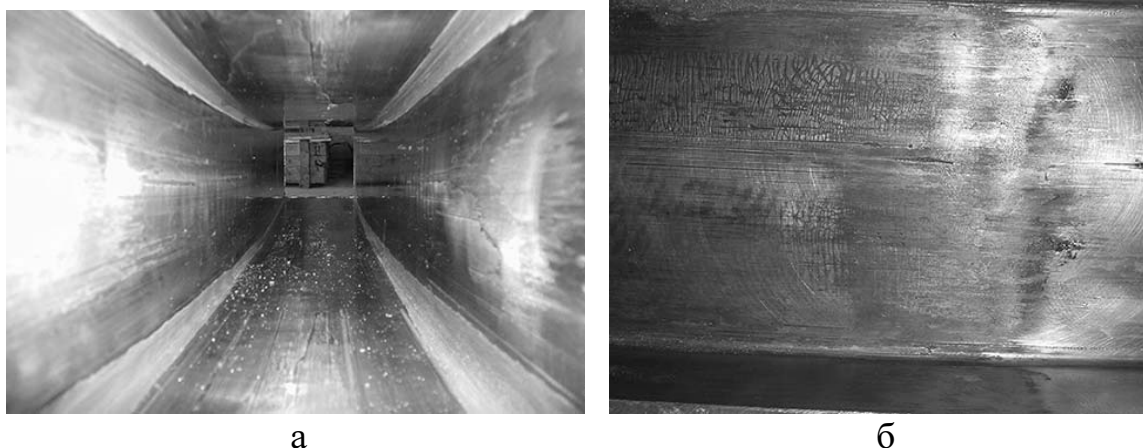


Рисунок 5 – Разрушение покрытия в многослойной гильзе при ее высокой стойкости

Таким образом, на основании выполненных исследований можно предложить следующую классификацию разрушения гильз кристаллизаторов сортовых МНЛЗ, в основу которой положена стойкость гильзы и причина выхода ее из строя. В соответствии с этим, указанные выше дефекты можно разделить на две группы: внезапно возникающие дефекты, которые вызывают низкую стойкость, и дефекты, накапливающиеся постепенно, при которых гильза показывает высокую стойкость (рис. 6.). Появление внезапных повреждений не прогнозируемо, они не связаны с конструкцией гильзы и могут возникать в любой период работы МНЛЗ, резко снижая долговечность кристаллизатора. Технологически прогнозируемые повреждения небольшие, они постоянно возникают при эксплуатации гильзы и статистически накапливаются во время работы, вызывая постепенное ухудшение эксплуатационных свойств кристаллизатора.

Поэтому минимальное значение стойкости не характеризуют качество покрытия и гильзы в целом. При эксплуатации без нарушений технологии, стойкость гильз определяется в первую очередь характеристиками покрытия. Из табл. 2 видно, что средняя стойкость у всех гильз с однослойным покрытием практически одинакова, максимальные значения стойкости также отличаются мало. У гильз производства «Кобелко» с однослойным покрытием эти значения несколько выше – эти гильзы имели шероховатую наружную поверхность, а ее рабочий профиль – e-mould, – специально разработан для литья с повышенными скоростями [5]. Поиск какого-

то более совершенного профиля рабочей поверхности гильзы в условиях интенсификации непрерывной разливки не даст заметного повышения стойкости; эффективным является только переход от однослойного покрытия к многослойному.

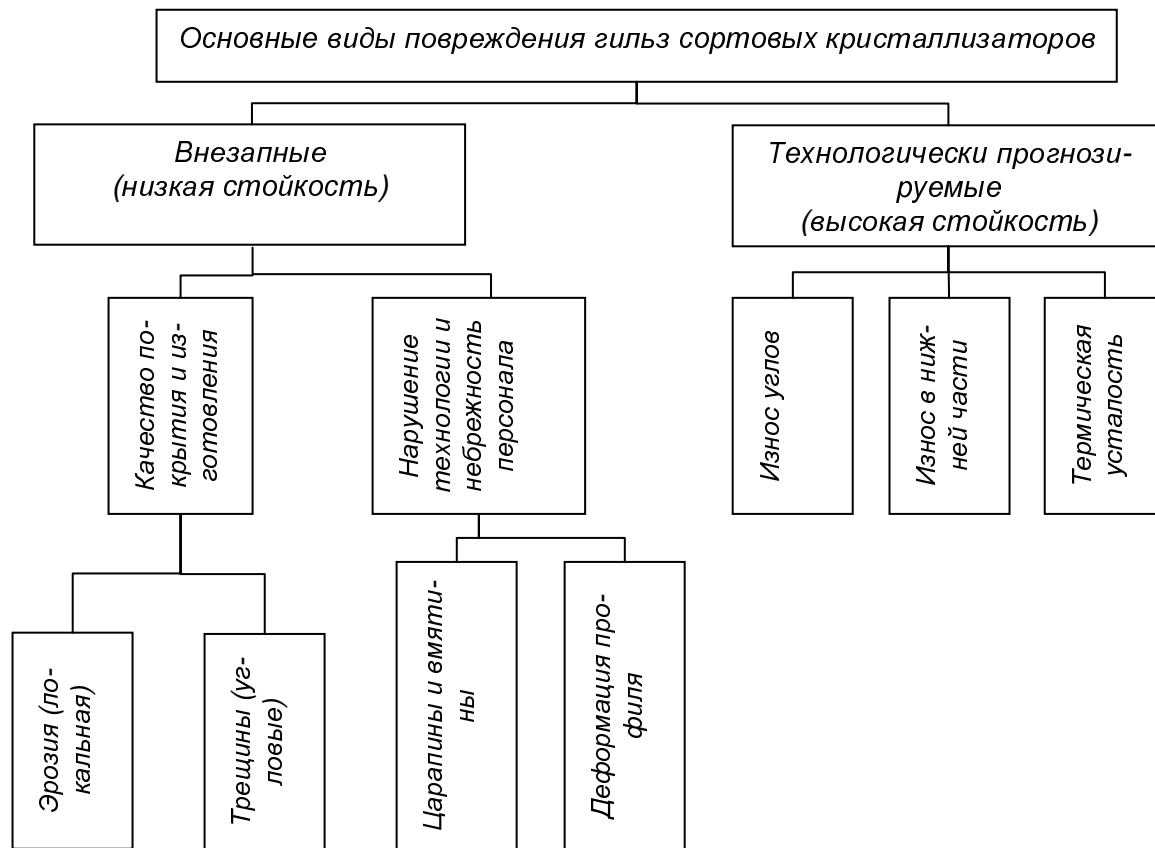


Рисунок 6 – Классификация повреждений гильз по стойкости кристаллизаторов

Литература

1. Перминов В.П., Гирский В.Е., Мурасов Ф.М., Чижиков А.И. Влияние формы рабочей поверхности кристаллизаторов на их стойкость и качество непрерывного слитка // Непрерывная разливка стали.– М.: Metallurgy, 1970.- С. 297 – 304.
2. Савченко В.А. Особенности эксплуатации кристаллизаторов радиальных МНЛЗ // Metallurg, 1983, № 8.– С. 20 – 21.
3. Маточкин В.А., Демин А.В., Ганкин В.Б., Николаев Г.И. Промышленные испытания гильз кристаллизаторов ВНИИМЕТМАШ на сортовой МНЛЗ РУП «Белорусский металлургический завод» / С. 126 – 129.
4. Особенности разрушения покрытий гильз кристаллизаторов высокоскоростных сортовых МНЛЗ / А.Н.Смирнов, И.В.Лейрих, Е.Н.Любименко, Е.Ю.Жибоедов // Научные работы ДонНТУ. Сер. металлургия, 2005, вып. 102.– С. 155 – 161.
5. Application of diamond high-speed casting technology at ispat unimetal / Noblot Alain, Sutter Pierre, Wimmer Franz, Frauenhuber Klaus, Gould Lawrence // MPT Int.– 2001, V. 24, № 1.- P. 66-68, 70.

© Лейрих И.В., Жибоедов Е.Ю. 2007