



УДК 621.74

Поступила 10.09.2013

А. А. СУСЛОВ, И. А. ПУГАЧЕВ, Липецкий государственный технический университет

## ИССЛЕДОВАНИЕ КАВИТАЦИОННО-ЭРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ЧУГУНА С РАЗЛИЧНОЙ ФОРМОЙ ГРАФИТА

*Разработана методика и проведены сравнительные исследования кавитационно-эрозионной стойкости чугуна с различной формой графита – пластинчатой, вермикулярной и шаровидной.*

*The technique is developed and researches of cavitation and erosive resistance of cast iron with a various form of graphite – flaked, vermicular and nodular are conducted.*

Детали машин и механизмов, работающие в контакте с потоком воды или иной рабочей жидкости, подвергаются своеобразному виду разрушения – эрозии поверхностного слоя. В движущемся потоке жидкости при определенных гидродинамических условиях происходит нарушение сплошности потока, приводящее к образованию полостей, каверн, пузырей, которые затем сокращаются и исчезают. Это явление, протекающее в жидкостном потоке, носит название кавитации.

При замыкании полостей происходит соударение ее поверхностей, инициирующее образование ударных волн, имеющих определенную глубину проникновения в толще рабочей жидкости и достигающих поверхности металлического корпуса детали, который в результате подвергается многократным высокочастотным гидравлическим ударами, вызывающим эрозию поверхности металла. В зависимости от интенсивности кавитации, времени воздействия, размера детали разрушение металлической поверхности может составлять доли квадратного миллиметра, а иногда достигать и нескольких квадратных метров. Глубина поражений также различна – вплоть до сквозной.

В соответствии с моделью Богачева-Минца [1] макрокартина разрушения чугуна может быть представлена в следующем виде: вначале металлическая поверхность становится шероховатой, появляется рельефность, т. е. происходят изменения, не связанные с потерей массы: сдвиги, дробление зерен на субзерна, структурные превращения. Это так называемый инкубационный период. Далее при накоплении усталости материала появляются первые кратеры разрушения, сопровождающиеся все увеличивающимися

потерями массы. Разрушение распространяется в глубь и вдоль направления потока движения жидкости. Очевидно, что чем длительнее инкубационный период и чем медленнее развивается разрушение, тем долговечнее материал.

Микроскопические исследования указывают на локальность воздействия нагружения и различное поведение отдельных структурных составляющих в зависимости от их свойств, т. е. избирательный характер разрушения в наиболее слабых местах. Кавитационное воздействие в ряде случаев усложняется вследствие изменения свойств контактирующего с потоком металла, например, в результате разогрева при трении о жидкость и связанного с этим разупрочнения или окисления материала. Немаловажную роль играет наличие в жидкости микроскопических твердых частиц, вызывающих абразивную эрозию.

Однако определяющим фактором остается кавитационная стойкость материала, определяемая его микроструктурой. Присущая чугунам гетерогенность и многофазность структуры всегда сказывается отрицательно, так как разные фазы обладают различным сопротивлением эрозионному разрушению.

Множественность нагружения и вибрация при кавитационном воздействии вызвали к жизни теорию усталостного разрушения в тонких поверхностных слоях. Развитие усталости приводит к зарождению микротрещин, которые в дальнейшем увеличиваются и срываются. Представления об усталостном разрушении логически связываются со стойкостью при кавитации, поскольку здесь также происходит многократное ударное нагружение, способное вызвать усталость. Однако и в дан-

ном случае не было экспериментально установлено всеобъемлющей зависимости между макросвойствами и кавитационным разрушением в микрообъемах.

Таким образом, все имеющиеся в настоящее время сведения о процессе кавитационного разрушения носят более или менее эмпирический характер, что отнюдь не стало преградой на пути разработки новых составов кавитационно-стойких материалов вообще и чугунов в частности.

Общие принципы, определяющие кавитационную стойкость, позволяют предугадать поведение чугуна при микроударном нагружении. Очевидно, что наиболее слабой структурной составляющей, практически не обладающей прочностью, является графит, который и будет разрушаться в первую очередь. Следовательно, через некоторый относительно малый промежуток времени на поверхности чугуна появятся раковины в местах, где ранее находился графит. Дальнейшее развитие разрушения будет определяться формой, характером расположения и дисперсностью этих раковин. Строеие металлической матрицы в большинстве случаев играет второстепенную и относительно небольшую роль.

Уменьшение количества графита и повышение удаленности графитовых включений друг от друга более существенно влияют на стойкость чугуна. Изменение формы графита – переход от пластинок к глобулям сказывается положительно вследствие повышения разобщенности включений и снижения остроты надреза. Но, вместе с тем, в сером чугуне демпфирование волны пластической деформации усиливается барьерным воздействием разветвленных пластинок графита, а в чугуне с шаровидным графитом (ЧШГ) волна продвигается гораздо свободнее [1].

Наличие значительной разобщенности включений графита (близкой к ЧШГ) и высокой демпфирующей способности (близкой к ЧПГ) предсказывает определенные потенциальные возможности чугуна с вермикулярным графитом (ЧВГ) в качестве кавитационно-стойкого материала. Однако большинство работ по исследованию кавитационного разрушения чугуна было сделано еще до широкого внедрения ЧВГ в практику, в силу чего какие-либо данные о кавитационной стойкости этого материала в литературе отсутствуют.

Целью данной работы являлось определение кавитационно-эрозионной стойкости ЧПГ марки СЧ30 и ЧШГ марки ВЧ50 как наиболее традиционных материалов для изготовления корпусов золотниковых гидрораспределителей по сравнению с новыми марками ЧВГ: ЧВГ35; ЧВГ40; ЧВГ45.

До настоящего времени разработан и апробирован ряд устройств и методик для ускоренного определения кавитационно-эрозионной стойкости различных материалов:

1. Ударно-эрозионный стенд, действие которого основано на многократном соударении о струю воды испытуемых образцов, закрепленных на ободе быстро вращающегося диска.

2. Диффузор, создающий непрерывный поток кавитирующей жидкости, в который помещается исследуемый образец. Эта установка чаще используется для изучения гидродинамики процесса.

3. Магнитострикционный вибратор, основанный на воспроизведении кавитационной зоны и ее сжатии при вибрации, получаемой за счет магнитострикции, т. е. изменения линейных размеров ферромагнитных материалов в переменном магнитном поле. Генератор магнитного поля возбуждает высокочастотные продольные колебания стрикционного стержня, на конце которого закреплен исследуемый образец, соударяющийся с поверхностью жидкости [1].

Отмечается, что между результатами испытаний, полученных при использовании описанных выше устройств, существует лишь качественное совпадение. Отсутствие количественного совпадения вполне закономерно и объясняется разницей в условиях испытаний и определенной абстрагированностью методик. Отсюда следует, что методика испытания материала для отливки корпусов распределителей на кавитационно-эрозионную стойкость (КЭС) должна с максимальной точностью имитировать условия работы реальных изделий, учитывать не только физико-механические свойства материала, но и геометрические параметры образцов, а также гидродинамические свойства рабочей жидкости.

Для проведения исследований была разработана методика и изготовлена опытная установка, позволяющая в максимальной степени имитировать процесс эрозионного разрушения отсечных кромок опорных поясков корпуса золотникового гидрораспределителя с диаметром условного прохода ДУ-16 мм.

В целях сокращения длительности испытаний осуществляли экстремализацию нагрузки за счет того, что образец подвергали воздействию кавитации не только в момент раскрытия или запираания канала, как это имеет место при эксплуатации изделия, а непрерывно в течение длительного времени.

Принцип действия установки: образец в виде кольца толщиной 3 мм и внутренним диаметром

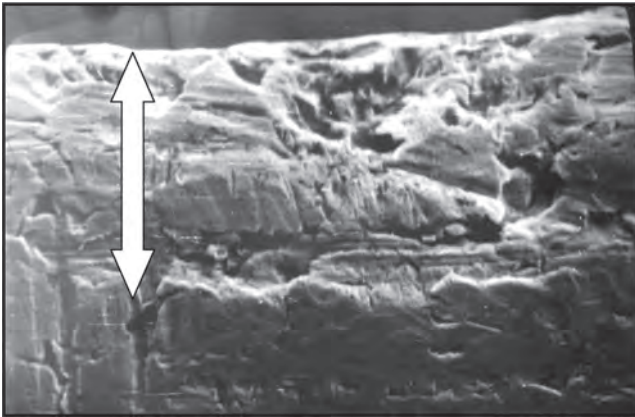


Рис. 1. Разрушение кромки образца из ЧПГ марки СЧ30.  $\times 500$

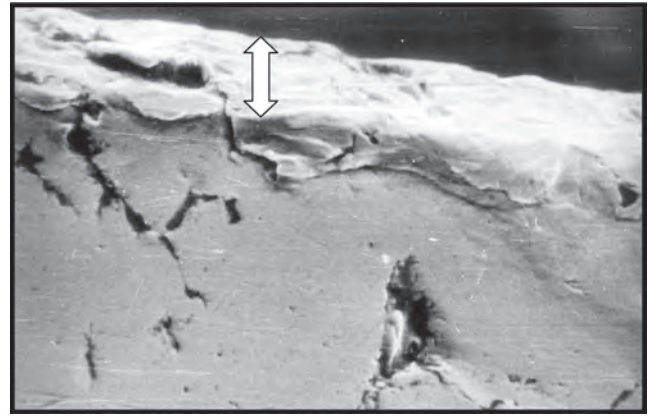


Рис. 2. Разрушение кромки образца из ЧВГ45.  $\times 500$

16 мм соосно устанавливали на цилиндрический стержень-контртело и размывали потоком кавитирующего минерального масла через кольцевую щель 0,1 мм. Данная конструкция полностью имитирует узел «отсечная кромка корпуса – отсечная кромка золотника» в реальном гидрораспределителе. Расход, давление и температуру масла поддерживали на постоянном уровне. Время испытаний составляло 7 и 14 ч, что по расчетам должно соответствовать  $2,5 \cdot 10^6$  и  $5 \cdot 10^6$  циклов срабатывания распределителя в условиях практической эксплуатации.

Порог кавитационно-эрозионной стойкости исчисляли по моменту появления первых кратеров разрушения на рабочей плоскости и кромке образца. Наличие кратеров разрушения определяли при исследовании на оптическом микроскопе ММР-4 при 10-кратном увеличении. Собственно кавитационно-эрозионный износ определяли как потерю массы образца за время испытаний.

ЧШГ для изготовления образцов выплавляли по общепринятым методикам, модифицирование в ковше проводили 2,2% модификатора ФСМг3; ЧВГ получали на базе того же расплава присадкой от 1,5 до 2,0% модификатора ФСМг3, содержание перлита регулировали присадками до 0,8% Си. ЧПГ марки СЧ30 имел низкое легирование 0,8% Ni и 0,25% Cr, графитизирующее модифицирование производили 0,8% ФСБа4. Контртело было изготовлено из стали 18ХГТ с последующей цементацией на глубину 0,4–0,6 мм. Твердость контртела составляла 56 HRC.

Как показывают результаты испытаний (см. таблицу), минимальной стойкостью обладают перлитный серый чугун СЧ30 и ферритный ЧВГ35, начавшие разрушаться уже после 7 ч испытаний. Для остальных материалов инкубационный период накопления усталости материала, очевидно, превышает 7 ч, так как за это время потери их массы

или наличия кратеров кавитационного разрушения выявлено не было. Ввиду бесперспективности образцы из ферритного ЧВГ были сняты с дальнейших испытаний. Через 14 ч максимальную потерю массы и ширину кавитационной зоны, видимую даже невооруженным глазом, имел образец из серого чугуна СЧ30. Сходную по величине кавитационную зону имел и образец из феррито-перлитного ЧВГ40, однако потеря его массы была в 3 раза ниже. Это свидетельствует о том, что разрушение в ЧВГ идет преимущественно по поверхности, а у ЧПГ проникает в глубину материала. Минимальные разрушения как по ширине зоны, так и по потере массы понес образец из чугуна с шаровидным графитом.

**Результаты испытаний**

Марка чугуна	Микроструктура	Через 7 ч		Через 14 ч		Балл
		потеря массы, мг	ширина зоны разрушения, мм	потеря массы, мг	ширина зоны разрушения, мм	
СЧ30	ПГ, П100	2	0,15	8	0,25	0
ЧВГ35	80%ВГ 20%ШГ П20	2	0,15	–	–	0
ЧВГ40	80%ВГ 20%ШГ П45	нет	нет	3	0,2	72
ЧВГ45	80%ВГ 20%ШГ П70	нет	нет	2	0,1	86
ВЧ50	ШГ П70	нет	нет	1	0,05	100

Фотографии кромок рабочих проток образцов из ЧПГ, ЧВГ и ЧШГ при увеличении 500, полученные на электронном микроскопе РЭМ-200, приведены на рис. 1–3. На рисунках отчетливо прослеживается более интенсивное кавитационно-эрозионное разрушение чугуна с пластинчатым графитом по сравнению с ЧВГ45 и ЧШГ.

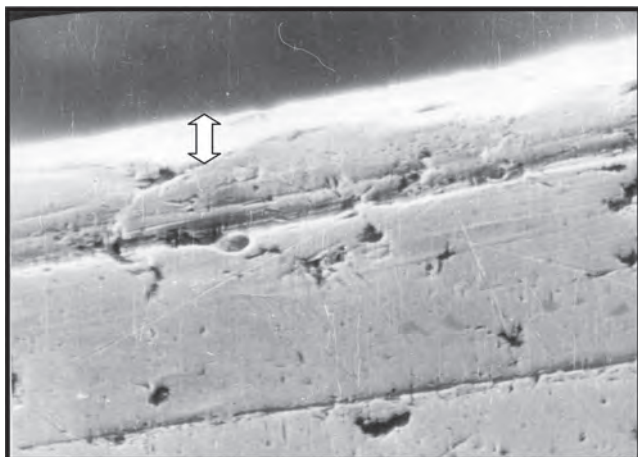


Рис. 3. Разрушение кромки образца из ЧШГ марки ВЧ50.  $\times 500$

Если для сравнительной оценки результатов ввести 100-балльную шкалу, в которой за нуль принять показатели СЧ30, а за 100 – показатели ВЧ50, то феррито-перлитный ЧВГ40 получает 72 балла, а перлитно-ферритный ЧВГ45 – 86 баллов, что свидетельствует о высоких эксплуатационных качествах ЧВГ в условиях кавитационно-эрозионного изнашивания.

Принимая во внимание ряд преимуществ ЧВГ перед ЧШГ, таких, как более высокие литейные свойства, меньшая склонность к усадке, лучшая обрабатываемость режущим инструментом, ЧВГ следует считать перспективным материалом для производства отливок корпусов деталей гидросистем.

### Литература

1. Богачев И. Н., Минц Р. И. Кавитационное разрушение железоуглеродистых сплавов. М.: Машгиз, 1959.