

УДК 621.787.4+620.193.16

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ИХ КАВИТАЦИОННУЮ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ

Петрова Екатерина Александровна¹, магистрант
e-mail: palamarchuk_ekaterina03@mail.ru

¹ Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Выполнен обзор работ по влиянию предварительной пластической деформации (ППД) на кавитационную износостойкость металлов. Актуальность связана с противоречивым эффектом ППД: повышая циклическую долговечность, может снижаться кавитационная стойкость. Рассмотренные методы увеличивают инкубационный период и снижают скорость эрозии благодаря наклёпу. Защитный эффект исчезает при удалении наклёпанного слоя. Сделан вывод, что ППД эффективна для повышения кавитационной стойкости, но результат зависит от режимов обработки и типа материала.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование, кавитация, предварительная деформация, кавитационное изнашивание.

EFFECT OF PRELIMINARY PLASTIC DEFORMATION OF METAL MATERIALS ON THEIR CAVITATIONAL WEAR RESISTANCE

Ekaterina A. Petrova¹, Master's Degree Student
e-mail: palamarchuk_ekaterina03@mail.ru

¹ Admiral S.O. Makarov State University of Maritime and River Fleet, Saint Petersburg, Russia

Abstract. A review of the effect of pre-plastic deformation (PD) on the cavitation wear resistance of metals has been performed. The relevance is related to the contradictory effect of PD: increasing the cyclic durability may reduce the cavitation resistance. The methods considered increase the incubation period and reduce the erosion rate due to the work hardening. The protective effect disappears when the work-hardened layer is removed. It is concluded that PD is effective for increasing the cavitation resistance, but the result depends on the processing modes and the type of material.

Keywords: surface plastic deformation, cavitation, pre-deformation, and cavitation wear.

Введение

Кавитационное изнашивание на водном транспорте приводит к разрушению гребных винтов, корпусов судов и проточной части гидравлических систем из-за схлопывания пузырьков, образовавшихся в местах изменений давления, скорости и направления потока жидкости.

На сегодняшний день проблеме кавитационного изнашивания уделен большой объем исследований. Фундаментальные методы, которые позволяют повысить износостойкость гребных винтов и других механизмов, — это изменение профиля лопастей и режима работы гребного винта, нанесение защитных покрытий, изменение состава материала путем добавления легирующих элементов, таких как хром и никель, и предварительная пластическая деформация поверхности.

Обработка поверхностным пластическим деформированием (ППД) — процесс упрочнения материала. При пластической деформации проявляется наклеп материала. Для реализации пластического деформирования металла, приложенное к материалу напряжение, должно превышать предел упругости конкретного материала. В теории обращаются к термину предел упругости — это максимальное напряжение, до которого материал деформируется только упруго. После снятия нагрузки он в полном объеме возвращается к исходной форме, а на практике по сути предел текучести — это напряжение, при котором материал начинает деформироваться пластически (необратимо). Существует поверхностное пластическое деформирование и объемное пластическое деформирование.

Методы поверхностного пластического деформирования:

1. Дробеструйное упрочнение;
2. Обкатка роликами и шариками.

Методы объемного пластического деформирования:

1. Ковка и штамповка;
2. Прокатка;
3. Прессование.

Актуальность темы статьи определяется двумя причинами.

1) В практике машиностроения часто используют метод ППД для повышения циклической долговечности деталей машин. Однако некоторые детали помимо циклических нагрузок испытывают также и кавитационное воздействие на поверхность. А поэтому вопрос влияния ППД на кавитационную износостойкость таких деталей очень важен, так как, повышая сопротивление усталости проведением обработки ППД, можно в то же время снизить кавитационную износостойкость материала. Примером детали, испытывающей одновременно и общие циклические нагрузки, и кавитационное воздействие, является гребной винт: его лопасти, работая в неравномерном поле скоростей за корпусом судна, подвержены одновременно циклически изменяющимся изгибным нагрузкам и кавитационному воздействию. Ускоренное после проведения обработки ППД возникновение на поверхности лопастей очагов кавитационного износа может свести к нулю эффективность ППД в повышении циклической долговечности, так как очаги износа служат сильными концентраторами напряжений.

2) В некоторых научных работах метод ППД рассматривается как один из способов повышения кавитационной износостойкости материала деталей, подверженных кавитационному воздействию. В то же время нет однозначного ответа на вопрос о влиянии предварительной пластической деформации на кавитационную износостойкость металлических материалов, а поэтому нельзя судить об эффективности метода ППД как способа повышения кавитационной износостойкости металлов.

Цель работы — аналитический обзор работ по влиянию предварительной пластической деформации на кавитационную износостойкость металлических материалов



Анализ проведённых исследований

А.П. Пимошенко, автор [1], осуществил разбор по влиянию на износостойкость чугунных втулок поверхностного упрочнения методом наклепа. Испытания показали, что гидростатическое давление, температура и состав охлаждающей среды влияют на степень кавитационных разрушений, и, предположительно, известный положительный эффект от применения упрочнения наклепом для повышения кавитационных стойкостей для сталей, применим для упрочнения чугуна. Степень упрочнения наклепом в работе оценивалась по измерению микротвердости, поверхностной пористости и чистоты по величине остаточных напряжений, и металлографическим анализом зарождения микротрещин. Лабораторные и натурные испытания показали, что после обкатки роликом на оптимальных режимах можно повысить кавитационную износостойкость чугуна СЧ 28-48 в 1,5-1,8 раз.

В исследовательской деятельности [2] О.В. Паитовой проведена оценка влияния интенсивной пластической деформации кручением под давлением на структуру и микротвердость алюминиевого сплава Д16 (Al-Cu-Mg) в сравнении с традиционной термической обработкой. Показано, что после термической обработки размер зёрен уменьшается в 4,8 раза, а микротвердость возрастает в 1,6 раза относительно исходного крупнозернистого состояния. Применение интенсивной пластической деформации кручением приводит к более сильному измельчению структуры: после одного оборота формируется ультрамелкозернистая структура с увеличением твёрдости в 2,4 раза, а после десяти оборотов – нанокристаллическая структура с ростом твёрдости в 2,9 раза. Установлено, что дополнительный вклад в упрочнение после интенсивной пластической деформации кручением вносит дисперсионное твердение за счёт образования частиц интерметаллидов и γ_2 -фазы, объёмная доля которых возрастает с увеличением числа оборотов. Таким образом, интенсивной пластической деформации кручением является эффективным методом получения ультрамелкозернистых и нанокристаллических состояний в сплаве Д16, обеспечивающим явное повышение твёрдости за счёт комбинации зернограничного, субзерненного, дисперсионного и твердорастворного механизмов упрочнения.

В научной публикации [3] проанализирована проблема кавитационной эрозии гильз цилиндров высокоскоростных дизельных двигателей, которая существенно снижает их надёжность. Авторы обобщают различные механизмы эрозии, включая вибрацию стенки гильзы, коррозионное воздействие, пористость поверхности и скорость потока охлаждающей жидкости, выделяя общий принцип повреждений. Экспериментальные данные показывают, что нанесение металлических или пластиковых покрытий, а также уменьшение зазора между поршнем и гильзой дают совсем незначительный эффект и часто экономически неоправданны. В работе сделан вывод, что наиболее эффективными методами борьбы с кавитационной эрозией являются конструктивные изменения, снижающие амплитуду вибрации и оптимизирующие гидродинамику охлаждающей жидкости.

В материале Автора [4] на основе анализа трёх примеров установлено, что применение антикоррозионных и противокавитационных добавок в охлаждающей жидкости не предотвращает кавитационную эрозию гильз с мокрым покрытием, а лишь изменяет характер повреждений. Показано, что коррозионная стойкость гильз снижается в условиях вибрации, вызванной сгоранием в дизельном двигателе, так как схлопывающиеся кавитационные пузырьки разрушают защитный оксидный слой, обнажая свежий металл. Наиболее значительное повышение стойкости к кавитационно-коррозионному разрушению достигается конструктивными изменениями, а именно увеличением толщины стенки гильзы. В работе также выявлено, что у гильз типа А с исходной микроструктурой и стандартной толщиной кавитационная эрозия наблюдалась в 25,3% случаев, тогда как после



модернизации (увеличение толщины стенки) новые гильзы этого типа не подвергались эрозии. Таким образом, изменение коррозионной стойкости является не химический состав охлаждающей жидкости, а механическая прочность и жёсткость самой гильзы, снижающие амплитуду вибрации и предотвращающие кавитацию.

Автор академического исследования [5] установил, что обработка глубокой прокаткой поверхностей аустенитных нержавеющей сталей AISI 304 и AISI 316 приводит к снижению потери массы при кавитационной эрозии по сравнению с необработанным состоянием, причём скорость износа после прокатки остаётся ниже исходной в течение первых 840 минут испытаний. Показано, что повышение кавитационной стойкости обусловлено формированием упрочнённого слоя, однако по мере его удаления эрозией защитный эффект полностью исчезает, и скорость износа возвращается к значениям необработанного материала. Обнаружена хорошая зависимость между скоростью кавитационного износа и параметрами усталостной прочности, что подтверждает механизм разрушения как усталостный при циклической деформации. Автор пишет, что поверхность после глубокой прокатки характеризуется менее глубокими и мелкими кратерами, а шероховатость поверхности и совокупная потеря массы линейно связаны для каждого типа обработки независимо от марки стали. Кроме того, экономическая оценка показывает, что применение глубокой прокатки позволяет снизить затраты, связанные с износом, более чем на 55% для обеих сталей, что делает этот метод перспективной альтернативой дорогостоящим покрытиям.

Авторы научного материала [6] раскрыли влияние высокотемпературного газового азотирования, последующей холодной обработки и рекристаллизационного отжига на стойкость к кавитационной эрозии дуплексной нержавеющей стали UNS S31803. Показано, что образцы после высокотемпературного газового азотирования проявляют более высокую кавитационную стойкость по сравнению с исходным состоянием и аустенитной сталью UNS S30403. Наибольшее повышение стойкости достигнуто после сочетания высокотемпературного газового азотирования и холодной прокатки. Механизм разрушения при кавитации различается: в образцах без холодной обработки повреждение инициируется по границам зёрен, тогда как в холоднодеформированных — преимущественно по двойниковым границам без следов пластической деформации внутри зёрен.

Научно-исследовательская работа [7] посвящена разбору влияния холодной пластической деформации, возникающей при механической обработке поверхности, на кавитационную стойкость наплавленного покрытия из аустенитной нержавеющей стали. Показано, что деформированные при холодной обработке поверхности имеют повышенную твёрдость, наличие линий скольжения и упрочнённый слой, тогда как после удаления этого слоя полировкой твёрдость возвращается к исходному уровню. Установлено, что холодная обработка не ухудшает, а напротив, повышает кавитационную стойкость: увеличивается время инкубации и снижается максимальная скорость эрозии. Основным механизмом является удлинение периода ускорения, а не полное удаление наклёпанного слоя, причём баланс между деформационным упрочнением и эрозионными механизмами достигается при глубине эрозии значительно меньшей, чем толщина наклёпанного слоя. Таким образом, предварительная холодная деформация поверхности может быть благоприятной для деталей, работающих в условиях кавитации, за счёт задержки выхода на максимальную скорость износа.

Суть работы [8] — проработка влияния холодной пластической деформации растяжением на стойкость к точечной коррозии и кавитационной эрозии высокоаустенитных нержавеющей сталей с содержанием легирующих элементов. Показано, что добавление молибдена значительно повышает стойкость к точечной коррозии, а частичная замена марганца никелем не даёт существенного улучшения.



Установлено, что холодная обработка до 40% не ухудшает стойкость к точечной коррозии, что объясняется высокой стабильностью аустенита и отсутствием деформационного мартенсита. В испытаниях на кавитационную эрозию предварительное деформирование увеличивает инкубационный период и снижает максимальную скорость эрозии, что связано с упрочнением. Таким образом, холодная обработка аустенитных сталей одновременно улучшает механические свойства и кавитационную стойкость, не снижая коррозионной стойкости, что делает их перспективными материалам.

Заключение

Анализ отразил, что предварительная пластическая деформация в большинстве случаев повышает кавитационную износостойкость металлов: увеличивается инкубационный период, снижается скорость эрозии и потеря массы. Эффект достигается за счёт наклёпа, роста твёрдости и измельчения зерна. Защита сохраняется до удаления наклёпанного слоя. При этом холодная деформация не ухудшает коррозионную стойкость аустенитных сталей. Таким образом, ППД является перспективным методом повышения кавитационной стойкости, но требует оптимизации режимов под конкретные условия.

Список литературы:

1. Пимошенко, А.П. Защита судовых дизелей от кавитационных разрушений / — Л.: Судостроение. — 1983. — С.119.
2. Паитова, О. В. Влияние интенсивной пластической деформации на структуру и свойства алюминиевого сплава системы Al-Cu-Mg / О. В. Паитова, Е. В. Бобрук, С. А. Шашерина, М. А. Скотникова // Изв. вузов. Приборостроение. — 2020. — Т. 63. — № 6. — С. 569–576.
3. Селим, С. М. Кавитационно-эрозионное повреждение гильз цилиндров дизельных двигателей / ERJ.: Инженерный исследовательский журнал, 2017. doi:10.21608/ERJM.2017.66330.
4. Салахутдинов, И. Р. Теоретическое обоснование снижения интенсивности кавитационного изнашивания стенок гильзы цилиндров нанесением антикавитационного покрытия / И.Р. Салахутдинов, А. А. Глущенко, А. Л. Хохлов // Вестник Ульяновской ГСХА. — 2022. — №2. —С. 58.
5. Бордеасу, И. Классификация нержавеющей сталей по устойчивости к кавитации /. — 2011.
6. Грахалес, Д. Влияние холодной обработки на устойчивость к кавитационной эрозии и механизмы разрушения аустенитных нержавеющей сталей с высоким содержанием азота / Wear. — 2011.
7. Бордеасу, И. Упрочнение при холодной деформации и устойчивость к кавитационной эрозии аустенитных нержавеющей сталей с различным содержанием дельта-феррита /. — 2014.
8. Пеге, Л. Влияние холодной обработки давлением на устойчивость нержавеющей сталей к точечной коррозии / Corrosion Science. — 2007.
9. Цветков, Ю. Н. Кавитационное изнашивание металлов и оборудования / Ю. Н. Цветков. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. — 153 с.

