

ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НА КИНЕТИКУ КАВИТАЦИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ ГИДРОТУРБИННОЙ СТАЛИ

Б.Н. Хватов

*Кафедра "Технология машиностроения,
металлорежущие станки и инструменты", ТГТУ*

*Представлена профессором В.А. Ваниным и
членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым*

Ключевые слова и фразы: деформационное упрочнение; кавитация; кавитационное разрушение; кинетика кавитационного разрушения; остаточные напряжения; поверхностный слой; шероховатость поверхности.

Аннотация: Приведены результаты исследования влияния разных методов обработки на состоянии поверхностного слоя и кавитационную эрозию гидротурбинной стали 06Х12Н3Д, позволившие получить новые представления о кинетике кавитационного разрушения поверхностного слоя деталей гидромашин. Приведены практические рекомендации по назначению рациональных методов их финишной обработки.

Кавитация (Cavitas (лат) — углубление, полость) как явление, связанное с разрывом сплошности движущейся жидкости, образованием в ней вакуумных пустот (каверн) и последующим их смыканием, сопровождаемых большими гидродинамическими ударами, известна без малого сто лет [1] и до настоящего времени представляет одну из серьезных проблем, связанную со значительными разрушениями лопастей гидравлических турбин, гребных винтов, лопаток авиационных двигателей, паровых и газовых турбин. Кавитационному разрушению подвержены практически все известные материалы: каучук и стекло, пластмассы и сверхтвердые материалы, коррозионно-стойкие и жаропрочные стали и сплавы.

Несмотря на многочисленные гипотезы, пытающиеся объяснить физическую природу кавитационного разрушения материалов [1], у исследователей до настоящего времени нет единого мнения по этой проблеме.

Согласно точке зрения, сложившейся у исследователей кавитационных явлений в гидротурбинах [2-4], первопричиной кавитационного разрушения деталей гидротурбин является усталостное разрушение микрообъемов материала вследствие многократного воздействия на них высокочастотных импульсов как отрывного действия (при образовании и отрыве кавитационных каверн) [2], так и ударного воздействия, сопровождающих их смыкание [3, 4]. При этом площадка приложения действия кавитационных импульсов имеет настолько ограниченные размеры, что процесс кавитационного разрушения следует рассматривать с позиций циклической прочности отдельных структурных составляющих или локальных микрообъемов металла. Ослабленные, вследствие потери связи с соседними, микрообъемы уставшего металла легко подвергаются вымыванию потоком, образуя глубоко-рельефную кавитированную поверхность, активизирующую процессы кавитации еще в большей степени.

На вероятную усталостную природу кавитационного разрушения материалов указывает также и то обстоятельство, что многочисленные попытки исследователей связать сопротивление кавитационному разрушению с каким-то одним или комплекс-

ными параметрами, характеризующими осредненные по объему механические свойства материала (пределом прочности, текучести, твердостью и др.), не привели к должному успеху [2].

Учитывая, что кавитационное разрушение деталей гидромашин начинается с тонких поверхностных слоев их материала, были проведены исследования влияния различных состояний физико-химических свойств металла поверхностного слоя и шероховатости поверхности на кавитационную стойкость гидротурбинной стали 06Х12Н3Д и кинетику ее разрушения.

Ранее в работе [5] были приведены результаты исследования влияния основных параметров поверхностного слоя: шероховатости поверхности, остаточных напряжений и наклепа после 8-ми видов обработки на кавитационную стойкость стали 06Х12Н3Д.

Однако длительность испытаний в проведенных исследованиях соответствовала общепринятым методикам кавитационных испытаний и составляла не более 3-5 часов, что не позволило в полной мере составить представление о кинетике полного разрушения поверхностного слоя образцов.

В данной работе приводятся результаты испытаний стали 06Х12Н3Д на кавитационную стойкость и кинетику (скорость) разрушения ее поверхностного слоя при увеличенной до 15 часов длительности испытаний.

Испытания проводили на магнитоотрицательном стенде НПО ЦНИИТмаш (г. Москва) в водопроводной воде при температуре 25 °С, частоте колебаний вибратора с образцом 8000 Гц и размахе колебаний $2A = 70$ мкм. Этот режим представляет достаточно жесткий режим кавитационного воздействия на испытываемый материал и применяется в НПО ЦНИИТмаш для сравнения кавитационной стойкости различных материалов [2].

Исследования проводили на круглых образцах после трех видов обработки: дробеструйном упрочнении, торцовом фрезеровании и ленточном шлифовании, позволившими сформировать изменение свойств поверхностного слоя стали 06Х12Н3Д в достаточно широких пределах (см. табл.).

Параметры состояния поверхностного слоя и кавитационная стойкость стали 06Х12Н3Д после исследуемых методов обработки

Вид обработки	Параметры состояния поверхностного слоя						Потери массы образцов, мг		
	Шероховатость R_a, R_z , мкм	Наклеп		Остаточные напряжения			3 ч	5 ч	15 ч
		глубина, мкм	степень, %	на поверхности, МПа	в подслое, МПа	глубина, мкм			
Дробеструйное упрочнение	45 (R_z)	350	56,7	-760	+100	700	80,6	125,3	252,4
Фрезерование торцовое	28 (R_z)	80	32,2	+350	-210	30	66,3	112,2	292,3
Шлифование абразивной лентой 14А12П	0,11	50	23,2	-450	-90	50	53,4	100,5	272,8

На рис. 1 приведен внешний вид кавитированной поверхности образцов после 3-х, 5-ти и 15-ти часов испытаний, из которых видно, как от характерных звездообразных зон разрушения после 3-х и 5-ти часов испытаний кавитированная поверхность образцов после 15-ти часов испытаний приобретает губчатое строение, охватывая практически всю площадь образца с глубоко проникающими каналами повреждения металла.



Рис. 1 Кинетика развития зоны кавитационной эрозии образцов стали 06Х12Н3Д после 3-х (а), 5-ти (б) и 15-ти (в) часов испытаний

На рис. 2 показаны графики потери массы образцов за приведенное время испытаний.

Как видно из рис. 2, характер кавитационной эрозии образцов после 15 ч испытаний изменяется и становится другим, чем при проведении традиционных 3-х или 5-ти часовых испытаний по общепринятым методикам. Так, первоначально высокая скорость эрозии дробеструенных образцов (кривая 1) после 7 ч испытаний начинает заметно ослабевать и после 10 ч она становится меньше, чем у образцов после фрезерования и ленточного шлифования, показавших вначале лучшую кавитационную стойкость (см. кривые 2, 3). Это можно объяснить тем, что в начальный период поверхность дробеструенных образцов с большей шероховатостью легче подвержена разрушениям, чем образцов с меньшей высотой микронеровностей после фрезерования и шлифования (см. табл.). По мере износа микрорельефа, поверхностный слой дробеструенных образцов с остаточными напряжениями сжатия, распространяющимися на глубокие слои металла, оказывает большее сопротивление разрушению стали при кавитации, чем после фрезерования и шлифования.

Проведенные исследования позволили выявить в кинетике кавитационной эрозии четыре разных по интенсивности периода разрушения (рис. 3), отмечаемых в трудах и других исследователей [1]. На наш взгляд, они отражают следующие этапы разрушения стали во времени.

Первый период (I) – инкубационный, преимущественно не связан с потерями массы материала. В течение этого периода под действием сосредоточенных кавитационных импульсов идут процессы накопления локальных пластических деформаций микрообъемами металла до критического значения их с зарождением в отдельных кристаллитах микротрещин усталостного характера.

Второй период (II) – период накопления разрушений. В этом периоде скорость эрозии достигает максимального значения, что связано с распространением ее на всю рабочую поверхность, так как металл уже подготовлен к разрушению вследствие накопленных деформаций. Процесс разрушения здесь носит характер как усталостного разрушения отдельных зерен, так и выкрашивания (скола, среза) целых конгломератов зерен, вызванных ослаблением прочности их связей с соседними,

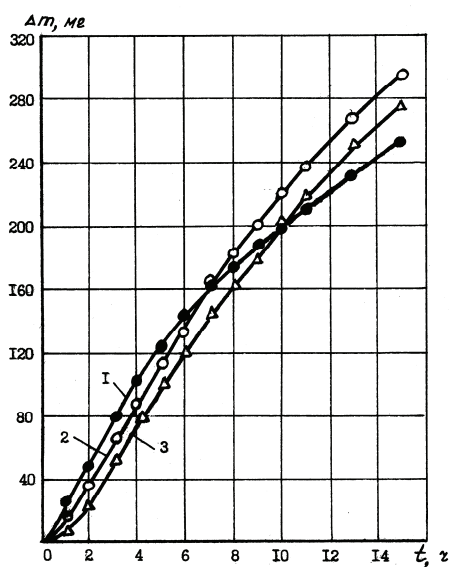


Рис. 2 Изменения потери массы образцов стали 06Х12Н3Д при кавитационном воздействии:

- 1 – дробеструйное упрочнение;
- 2 – торцовое фрезерование;
- 3 – шлифование лентой 14А12П

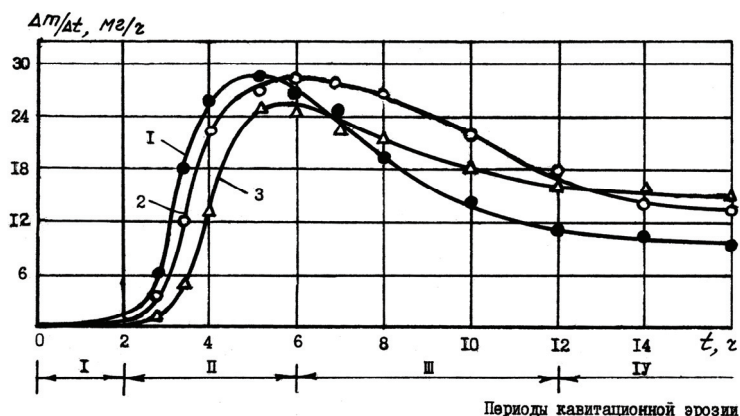


Рис. 3 Изменение интенсивности кавитационной эрозии образцов стали 06Х12Н3Д во времени с различной обработкой поверхности:

1 – дробеструйное упрочнение; 2 – фрезерование; 3 – ленточное шлифование

получившими повреждения, микрообъемами металла. Кавитированная поверхность приобретает характерное губчатое строение с отдельными, глубоко проникающими каналами (см. рис. 1, в).

Третий период (III) — период ослабления эрозии. Наличие этого периода связывают [1] с демпфирующими свойствами образовавшихся и заполненных жидкостью углублений в кавитированном металле гасить энергию кавитационных импульсов, предохраняя таким образом поверхность от интенсивного разрушения.

И четвертый период (IV) – период относительно стабильной эрозии, интенсивность разрушения в котором определяется структурой и физико-химическими свойствами основного металла.

Анализ приведенных на рис. 3 кинетических кривых показывает, что изменения скорости эрозии образцов при кавитации находятся в прямой зависимости от состояния их поверхностных слоев.

Так, для первых двух периодов, отмеченных в кинетике разрушения, износ связан в основном с накоплением деформаций и разрушением поверхностных слоев материала, образующих микропрофиль рабочей поверхности образцов. Длительность инкубационного периода и интенсивность эрозии для этих этапов хорошо коррелируются с параметрами шероховатости поверхности образцов: самая высокая скорость эрозии отмечается у дробеструенных образцов с наибольшей шероховатостью поверхности (рис. 3, кривая 1), самая низкая – для шлифованных образцов (кривая 3) и промежуточное положение занимают соответственно образцы после фрезерования (кривая 2).

По мере износа микровыступов на рабочей поверхности интенсивность эрозии уменьшается. Сопротивление кавитационному разрушению в III-ем периоде определяется значениями параметров физико-химического состояния поверхностного слоя образцов. Наибольшая скорость эрозии при этом наблюдается у фрезерованных образцов с остаточными напряжениями растяжения в поверхностном слое (см. табл.). Промежуточные значения интенсивности эрозии соответствуют образцам после ленточного шлифования с остаточными напряжениями сжатия, заключенными в тонком (50 мкм) поверхностном слое, и поэтому быстро утрачивающими свое влияние. Самые низкие значения скорости эрозии для III-го периода соответствуют образцам после дробеструйного упрочнения с остаточными напряжениями сжатия, распространяющимися на глубокие (до 0,7 мм) слои металла.

Наличие глубокого слоя с остаточными напряжениями сжатия позволяет дробеструенным образцам оказывать высокое сопротивление кавитационной эрозии на протяжении более, чем 15 ч интенсивного кавитационного воздействия, когда влияние

поверхностных слоев других образцов в связи с их износом полностью прекратилось, т.е. IV-ый период в кинетике разрушения для дробе-струенных образцов еще не наступил.

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать следующее заключение в отношении влияния параметров состояния поверхностного слоя на сопротивление гидротурбинной стали кавитационному разрушению.

Поверхностный слой деталей проточной части гидротурбин, формируемый в результате различных методов их механической обработки, оказывает значительное влияние на сопротивление кавитационному разрушению в начальный период эксплуатации. Наличие большой шероховатости поверхности после механической обработки приводит к более раннему развитию очагов эрозии, которые затем быстро прогрессируют, охватывая значительные площади рабочей поверхности детали. Установлено, что шероховатость поверхности практически не влияет на кинетику кавитационного разрушения со значений параметра $Ra \leq 1,2$ мкм, сохраняя при этом тенденцию к снижению эрозии с уменьшением высоты микронеровностей.

Остаточные напряжения сжатия имеют положительное влияние на сопротивление стали кавитационной эрозии. Эффективность этого влияния возрастает с увеличением их абсолютных значений на поверхности и, особенно, с увеличением глубины залегания.

Деформационное упрочнение поверхностного слоя при механической обработке является положительным фактором в увеличении кавитационной стойкости стали 06X12H3Д до его степени $U_H = 20-25$ %.

Большие значения наклепа, как это было установлено в работе [5], для данной марки мартенситной стали может иметь отрицательное значение вследствие возможного перенаклепа поверхностных слоев, так как кавитационное воздействие сопровождается своим деформационным упрочнением ("кавитационным наклепом") и предварительный наклеп от механической обработки с точки зрения термодинамики является уже совершенной работой разрушения кристаллической решетки.

Из исследованных видов механической обработки в обеспечении кавитационной стойкости стали 06X12H3Д преимущества имеют процессы шлифования эластичными абразивными инструментами и упрочнения поверхностно-пластическим деформированием результаты лабораторных испытаний образцов показали, что ленточное шлифование, шлифование фибровыми кругами, а также дробе- и гидродробеструйное упрочнение приводят к улучшению кавитационной стойкости стали.

Список литературы

1. Greim H. Kavitation – eine Übersicht // Technische Rundschau Sulzer. – 1974. – В. 56: Forschungshefts. – S. 87-112.
2. Тимербулатов М.Г. Механизм кавитационной эрозии и влияние на нее коррозионной стойкости металлов // Физико-химическая механика материалов. - 1969. - № 1. - С. 50-53.
3. Пылаев Н.И., Эдель Ю.У. Кавитация в гидротурбинах. - Л.: Машиностроение, 1974. - 256 с.
4. Щелканов А.Ф. Состояние поверхности металла и характер начального разрушения при кавитации // Энергомашиностроение. - 1972. - № 1. - С. 25-27.
5. Овсеенко А. Н., Хватов Б. Н., Тимербулатов М.Г. Влияние состояния поверхностного слоя на кавитационную эрозию гидротурбинной стали // Энергомашиностроение. - 1982. -№ 2.-С. 26-29.

Influence of Upper Layer Condition on Kinetics of Cavitation Destruction of Hydraulic Turbine Steel

B.N. Khvatov

Department "Technology of Engineering, Metal-Cut Tools and Instruments", TSTU

Key words and phrases: deformation reinforcement; cavitation; cavitation destruction; kinetics of cavitation destruction; remaining stresses; upper layer; surface roughness.

Abstract: The results of investigating the influence of different processing methods on the condition of upper layer and cavitation erosion of hydraulic turbine steel are given. They allow to obtain new ideas about kinetics of cavitation destruction of hydro-machine parts upper layer. Practical recommendations concerning application of rational methods and final processing are given.

Einfluß des Zustandes der Oberschichte auf die Kinetik der Kavitationszerstörung vom Hydroturbinenstahl

Zusammenfassung: Es sind die Ergebnisse der Untersuchung des Einflusses der verschiedenen Methoden, der Bearbeitung auf den Zustand der Oberschichte und auf die Kavitationserosion des Hydroturbinenstahles angeführt. Sie erlauben es die neue Vorstellungen über der Kinetik der Kavitationszerstörung der Oberschichte der Werkstücke der Hydromaschinen zu erhalten. Es sind die praktischen Empfehlungen nach den Rationalmethoden seiner Endbearbeitung angeführt.

Influence de l'état de la couche superficielle sur la cinétique de la destruction de cavitation de l'acier de la turbine hydraulique

Résumé: On cite les résultats des études de l'influence de différentes méthodes du traitement sur la couche superficielle et sur l'érosion de cavitation de l'état de la turbine hydraulique, qui ont permis de recevoir de nouveaux représentations de la cinétique de la couche superficielle des pièces des machines hydrauliques. On cite les recommandations pratiques pour l'utilisation de méthodes rationnelles de leur traitement final.
