

УДК 620.172.254:669.14

А.В. Славин<sup>1</sup>, А.А. Ляхов<sup>1</sup>, А.А. Вишталюк<sup>2</sup>, О.В. Кузьмина<sup>2</sup>,  
И.В. Гулина<sup>1</sup>, Н.О. Яковлев<sup>1</sup>, А.В. Гриневиц<sup>1</sup>

## ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ АЗОТИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ СТАЛЕЙ 38Х2МЮА И 30Х3МА

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-76-84

*Рассматриваются особенности деформации и разрушения образцов сталей, прошедших химико-термическую обработку, на примере испытаний азотированных образцов сталей 38Х2МЮА и 30Х3МА. Установлено, что механические свойства, определяемые при испытании на растяжение, образцов с высокотвердым хрупким слоем не могут служить расчетными характеристиками при оценке несущей способности деталей, прошедших химико-термическую обработку. Испытания азотированных образцов сталей 38Х2МЮА и 30Х3МА продемонстрировали сложный процесс их деформации и разрушения, а результаты испытания показали, что чувствительность данных сталей, обработанных по режиму «закалка + высокий отпуск», к наиболее опасному концентратору напряжений, каким является трещина, отсутствует.*

**Ключевые слова:** химико-термическая обработка, азотирование, хрупкий слой, несущая способность, разрушение гетерогенного материала, сложное напряженное состояние.

A.V. Slavin<sup>1</sup>, A.A. Lyakhov<sup>1</sup>, A.A. Vishtalyuk<sup>2</sup>, O.V. Kuzmina<sup>2</sup>,  
I.V. Gulina<sup>1</sup>, N.O. Yakovlev<sup>1</sup>, A.V. Grinevich<sup>1</sup>

## FEATURES OF DESTRUCTION OF NITRIDED SAMPLES OF 38H2MYuA AND 30H3MA STEELS

*The article deals with the features of deformation and destruction of samples that have undergone chemical-thermal treatment, using the example of testing nitrided samples of steels 38H2MYuA and 30H3MA. It is established that the mechanical properties determined during the tensile testing of samples with a highly rigid brittle layer cannot serve as design characteristics when evaluating the bearing capacity of parts that have undergone chemical-thermal treatment. Testing of nitrided samples of 38H2MYuA and 30H3MA steels demonstrated a complex process of their deformation and destruction, and the test result showed that this steel treated to the «hardened + high tempering» mode sensitivity to the most dangerous concentration the crack is absent.*

**Keywords:** chemical-thermal treatment, nitriding, brittle layer, load-bearing capacity, destruction of heterogeneous material, complex stress state.

---

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

<sup>2</sup>Акционерное общество Гаврилов-Ямский машиностроительный завод «Агат» [JSC Gavrilov-Yam Machine-Building Plant «Agat»]; e-mail: agat@gmzagat.ru

### Введение

Основными характеристиками, задающими несущую способность силовых конструкций, являются показатели статической прочности материалов, определяемые на стандартных образцах в условиях растяжения. Пределы прочности и текучести при растяжении являются основными расчетными характеристиками статической прочности

деталей. Однако в ряде случаев работоспособность деталей определяют иные механические свойства [1]. Для трущихся пар (например, шестеренок, валиков и роликов) основным показателем работоспособности является износостойкость, характеризующая сопротивление материала разрушению поверхности путем отделения его частиц под действием силы трения [2–4]. Обеспечение повышенной износостойкости возможно при достижении высоких показателей твердости трущейся поверхности [5]. Однако повышение твердости конструкционной стали, равно как и ее прочности, сопряжено со снижением вязкости разрушения и, как следствие, с неизбежностью хрупкого разрушения детали. Для реализации высокой твердости поверхности детали при сохранении несущей способности сердцевины, воспринимающей силовой поток, разработаны различные методы химико-термической обработки – цементация, нитроцементация и азотирование [6].

Для силовых деталей наличие высокотвердого внешнего слоя создает определенную проблему в части их надежности, поскольку трещина в поверхностном слое может явиться инициатором хрупкого разрушения детали. В связи с этим возникает проблема оценки механических свойств материала, прошедшего химико-термическую обработку. Очевидно, что оперировать традиционными прочностными понятиями (такими как пределы прочности и текучести материала) неправомерно, поскольку механические свойства, полученные по стандартным методикам, будут зависеть от размеров образца, толщины высокотвердого слоя и других параметров. Нормированные показатели прочности, определяемые по ГОСТ 1497–84 на химико-термически обработанных образцах, не могут быть использованы при расчетах на прочность [7, 8].

При испытании образцов, прошедших химико-термическую обработку, целесообразно оперировать понятием «несущая способность», а не нормированными прочностными показателями. В этом случае образец рассматривается как определенная конструкция, состоящая из исходного материала и измененного поверхностного слоя [9]. Несмотря на то, что данные испытаний распространяются на образец конкретного размера и на конкретную величину упрочненного слоя и не могут быть использованы в расчетах на прочность, некоторые закономерности разрушения комбинированного образца могут применяться при проектировании силовых деталей с химико-термической обработкой.

### Материалы и методы

Объектом исследований являлись азотированные образцы из сталей 38Х2МЮА и 30Х3МА [10, 11], химический состав которых представлен в табл. 1 [12]. Следует отметить, что изначально разработана азотируемая сталь 30Х3ВА, где основным легирующим компонентом был вольфрам. Впоследствии наряду с вольфрамом стал применяться молибден. Поскольку основные механические свойства, используемые при анализе прочностных характеристик азотированных образцов, получены для стали 30Х3ВА, то именно она используется при анализе и ее химический состав включен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав образцов азотируемых сталей

Сталь	Содержание элементов, % (по массе)								
	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	Al	Ni (не более)	S и P (не более)
38Х2МЮА (38ХМЮА)	0,38	0,32	0,45	1,5	0,2		0,9	0,4	0,025
30Х3ВА	0,31	0,27	0,45	3,0		1,0	–	0,5	0,025
30Х3МА	0,31	0,27	0,45	3,0	0,3		–	0,5	0,025

Термическая обработка исследуемых образцов из стали 38Х2МЮА состояла из закалки в масле с температуры 930–950 °С при выдержке 60–90 мин и последующего отпуска при температуре 590–610 °С в течение 60–90 мин с охлаждением на воздухе.

Исследуемые образцы из стали 38Х2МЮА прошли химико-термическую обработку – азотирование. Для данных образцов принят двухступенчатый режим азотирования [10]: первая ступень осуществлялась при температуре 500–520 °С в течение 21–22 ч, а вторая ступень – при температуре 530–550 °С в течение 21–22 ч.

Для последующего анализа механических характеристик при разрушении исследуемых азотируемых образцов в условиях растяжения рассмотрим механические свойства стали 38Х2МЮА после термической обработки, представленной в технических условиях. Рекомендуемый и хорошо отработанный режим термической обработки для такой стали включал закалку в масле или теплой воде с температуры 930–950 °С с последующим отпуском при температуре 600–670 °С и охлаждением в масле или воде. Данный режим гарантировал получение следующих свойств: предел прочности при растяжении 980 МПа, относительное удлинение после разрыва 15 %, относительное сужение после разрыва 50 %. Поскольку данные механические свойства представлены в технических условиях и, следовательно, рассматриваются как приемо-сдаточные характеристики, то их величины не могут быть меньше указанных значений. Идентичность термической обработки исследуемых образцов из стали 38Х2МЮА и термической обработки, зафиксированной в технических условиях на сталь 38Х2МЮА (38ХМЮА), является основанием для оценки механических свойств сердцевины азотированных образцов из стали 38Х2МЮА.

Сталь 30Х3МА и по режимам термообработки, и по реализованным механическим свойствам полностью идентична стали 30Х3ВА, в которой вольфрам частично или полностью заменен на молибден из расчета 1 мас. ч. молибдена к 3 мас. ч. вольфрама. Разработанная ранее азотируемая сталь 30Х3ВА применяется в силовых деталях реактивных двигателей, в том числе в деталях, температура эксплуатации которых достигает 500 °С. Стандартная термическая обработка такой стали включает закалку в масле или теплой воде с температуры 870–890 °С и последующий отпуск при температуре 580–620 °С. Термическая обработка, выполненная по данному режиму, обеспечивает получение следующих механических характеристик: предел прочности при растяжении 980 МПа, относительное удлинение после разрыва 15 %, относительное сужение после разрыва 50 %. Показатели предела прочности и пластичности представлены значениями, указанными в технических условиях и устанавливающими нижний уровень механических свойств.

Термическая обработка исследуемых образцов из стали 30Х3МА состояла из закалки на воздухе с температуры 870–890 °С при выдержке 60–90 мин и последующего отпуска на воздухе при температуре 550–570 °С в течение 90–120 мин. Азотирование исследуемых образцов из стали 30Х3МА проводили по двухступенчатому режиму: первая ступень осуществлялась при температуре 500–520 °С в течение 40 ч, а вторая ступень – при температуре 540–560 °С в течение 35 ч.

Режимы термической и химико-термической обработок образцов из стали 30Х3МА в основном соответствуют режимам, представленным в технических условиях, что является основанием использования механических свойств стали 30Х3МА, представленных в технических условиях, при анализе несущей способности исследуемых азотируемых образцов.

Исследуемые образцы изготавливали в соответствии с эскизом, представленным на рис. 1.

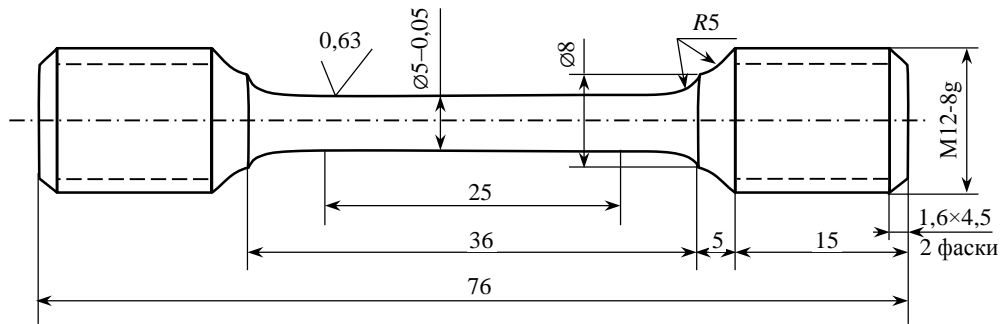


Рис. 1. Эскиз образца из сталей 38Х2МЮА и 30Х3МА

Проводили азотирование всей поверхности образцов, за исключением резьбовых поверхностей, которые защищены жидким стеклом.

Испытания на растяжение образцов из сталей 38Х2МЮА и 30Х3МА после химико-термической обработки проводили на электромеханической испытательной машине при скорости перемещения подвижной траверсы 1 мм/мин. Погрешность определения усилия не превышала 0,5 %. Испытания проводили при повышенной температуре: 120 °С. Точность поддержания температуры на образце составляла  $\pm 1$  °С.

### Результаты и обсуждение

В результате испытаний на растяжение азотированных образцов из сталей 38Х2МЮА и 30Х3МА получены диаграммы «усилие–деформация», резко отличающиеся от традиционных диаграмм «напряжение–деформация» для улучшаемых сталей.

Диаграммы «усилие–деформация» для азотированных образцов из стали марки 38Х2МЮА представлены на рис. 2.

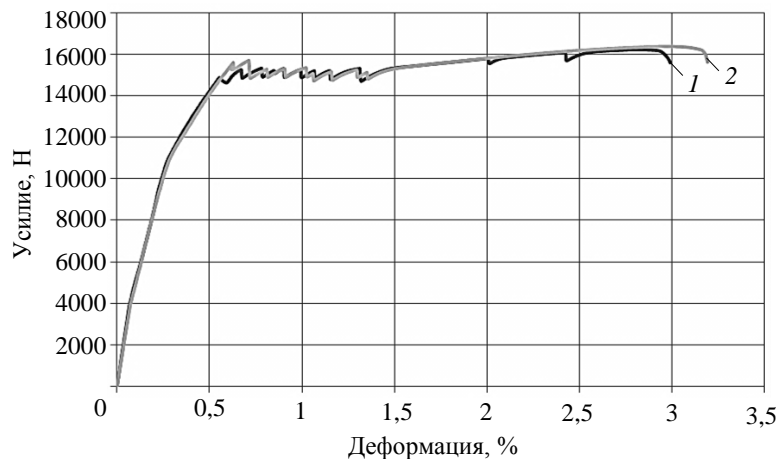


Рис. 2. Диаграммы «усилие–деформация» образцов 1 и 2 из стали 38Х2МЮА

Существенное «искажение» диаграммы «усилие–деформация», выразившееся в множественности срывов по нагрузке, по сравнению с традиционной «гладкой» диаграммой деформирования, соответствующей данному сплаву, обусловлено гетерогенностью азотированного образца и сложным характером разрушения его составляющих.

Аналогичное «искажение» диаграммы «усилие–деформация» имеет место и для азотированных образцов из стали 30Х3МА (рис. 3). Диаграммы, характеризуются резким срывом нагрузки, в основе которого лежит хрупкое разрушение азотированного слоя.

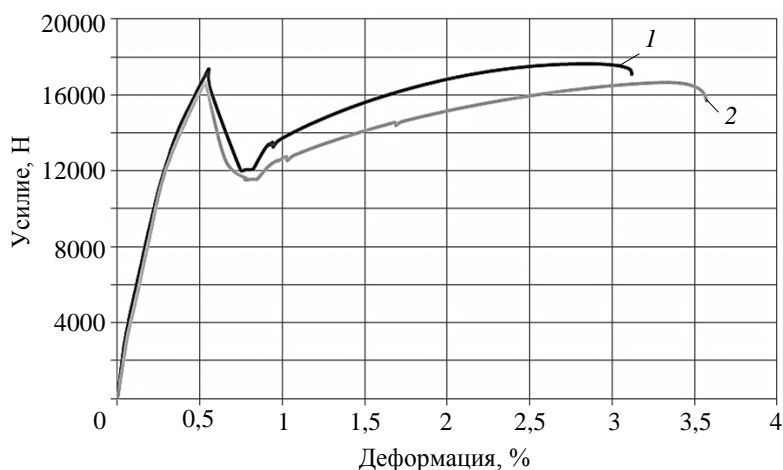


Рис. 3. Диаграммы «усилие–деформация» образцов 1 и 2 из стали 30Х3МА

Отказ от представления процесса деформирования исследуемых образцов в координатах «напряжение–деформация» обусловлен гетерогенностью образцов и различием напряжений в разных зонах азотированного образца. Гетерогенность исследуемых азотированных образцов из сталей 38Х2МЮА и 30Х3МА привносит и очевидную условность в определение стандартных прочностных характеристик.

Механические характеристики, определенные при разрушении азотированных образцов из сталей 38Х2МЮА и 30Х3МА в условиях растяжения, представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Механические свойства азотированных образцов из сталей  
38Х2МЮА и 30Х3МА, полученные в условиях растяжения**

Сталь	Условный номер образца	Максимальная нагрузка, Н	Относительное удлинение после разрыва, %	Относительное сужение после разрыва, %	Формальный предел прочности при растяжении, МПа
38Х2МЮА	1	16200	3,2	1,6	840
	2	16400	3,2	3,2	840
30Х3МА	1	17600	2,9	3,5	890
	2	16700	3,0	2,8	860

Несмотря на то, что все процедуры определения механических свойств: предела прочности при растяжении, относительного удлинения и относительного сужения после разрыва – в полной степени соответствовали ГОСТ 1497–84, все приведенные показатели крайне условны и применимы только для данных образцов. Следует признать, что показатели механических характеристик не могут быть использованы при прочностных расчетах.

В том случае, если значения относительного удлинения и относительного сужения после разрыва фиксируют реальную картину деформирования и разрушения азотированного образца, тогда оценка предела прочности является исключительно формальной. Формализм заключается в использовании процедуры оценки однородных материалов при растяжении для определения прочностных характеристик гетерогенного материала, каковым является азотированный образец.

Общий вид разрушенных азотированных образцов из сталей 38Х2МЮА и 30Х3МА представлен на рис. 4.

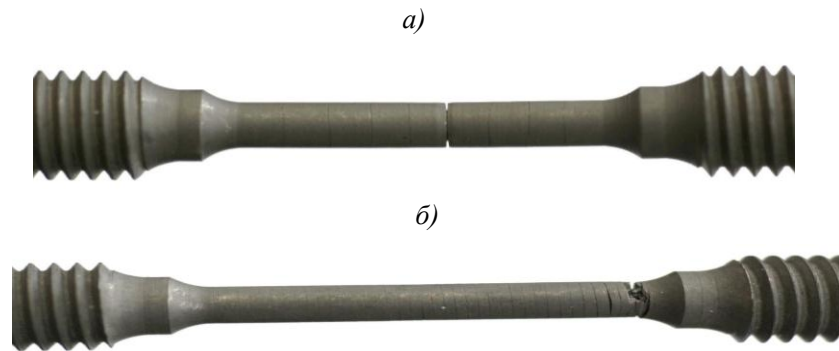


Рис. 4. Общий вид разрушенных образцов из сталей 38X2MЮА (а) и 30X3МА (б)

На рис. 5 представлены поверхности изломов образцов из сталей 38X2MЮА и 30X3МА.

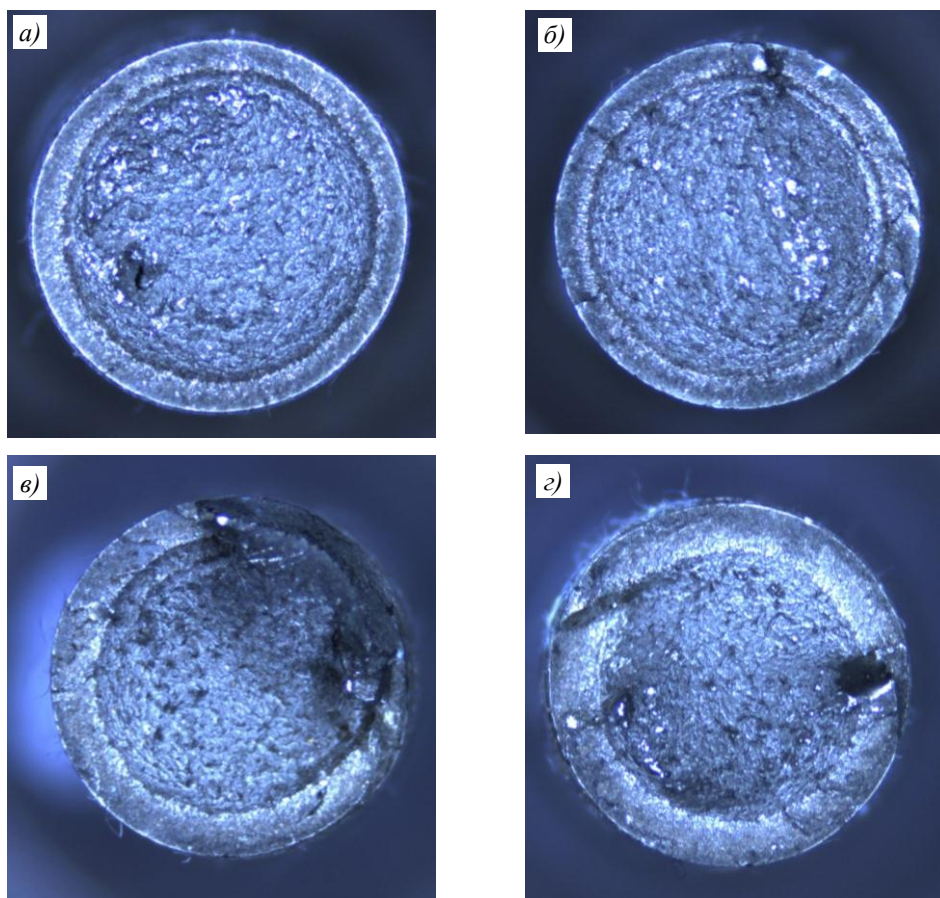


Рис. 5. Поверхности изломов образцов 1 (а) и 2 (б) из стали 38X2MЮА и образцов 1 (в) и 2 (г) из стали 30X3МА

На рис. 5 отчетливо видны зона хрупкого разрушения азотированного слоя и вязкое разрушение сердцевины образцов.

Выполнена оценка толщины азотированного слоя по четырем точкам, отстоящим друг от друга на 90 градусов, результаты которой представлены в табл. 3.

Оценка толщины азотированного слоя позволяет определить несущую способность азотируемых образцов.

Толщина азотированного слоя на образцах из сталей 38Х2МЮА и 30Х3МА

Сталь	Условный номер образца	Диаметр образца, мм	Толщина азотированного слоя, мм, при измерении				Средняя толщина слоя, мм
			1	2	3	4	
38Х2МЮА	1	4,97	0,44	0,41	0,39	0,44	0,42
	2	5,00	0,48	0,43	0,47	0,47	0,46
30Х3МА	1	5,03	0,61	0,53	0,51	0,60	0,56
	2	4,98	0,71	0,71	0,63	0,74	0,70

Изломы образцов, представленные на рис. 5, отчетливо фиксируют различия поверхностей разрушенных азотированных образцов из сталей 38Х2МЮА и 30Х3МА – хрупкое разрушение поверхностного азотированного слоя и вязкое разрушение сердцевины образца. Это наглядно иллюстрирует, что образцы после химико-термической обработки, представляя единое целое, состоят из двух материалов, обладающих различными механическими свойствами. Поверхностный азотированный слой имеет существенно более высокую твердость, нежели сердцевина образца и, следовательно, меньшую пластичность. Значения модуля упругости азотируемого поверхностного слоя и сердцевины образца также отличаются, что приводит к неравномерности их нагружения и возникновению разного уровня напряжений в этих составляющих. Исходя из этого, нецелесообразно определять пределы прочности или текучести при растяжении для образцов, прошедших химико-термическую обработку, поскольку эти характеристики применимы только для данных конкретных образцов и не могут являться некоторыми константами материала, а также очевидна их зависимость от диаметра образца, глубины азотируемого слоя и соотношения площади азотированного слоя и исходной площади образца. Таким образом, показатель прочности, представленный в табл. 5, определяет только несущую способность испытанных образцов, не может быть распространен на другие азотированные образцы и тем более не может быть использован при оценке прочности азотируемых деталей.

Логичным представляется не определение характеристики прочности, которая соотносится с площадью разрушения всего образца, а оценка несущей способности образца путем исследования процесса разрушения гетерогенных зон с учетом толщины высокотвердого слоя, полученного химико-термической обработкой.

Разнородность свойств материала образцов после химико-термической обработки достаточно четко проявляется на диаграммах разрушения, представленных на рис. 2 и 3.

Диаграмма «усилие–деформация» для азотированных образцов из стали 38Х2МЮА (рис. 2) указывает на сложный механизм их разрушения [13]. Априори можно утверждать, что поверхностный азотированный слой и исходный материал сердцевины имеют различные значения механических свойств, в том числе и модуля упругости. Разные значения модуля упругости при заданной деформации образца приводят к разной нагруженности основного металла сердцевины и азотированного слоя. Более высокий модуль упругости азотированного слоя, по сравнению с основным материалом сердцевины, приведет к более высокому уровню напряжений. При этом диаграмма «усилие–деформация» позволяет фиксировать некоторый усредненный модуль упругости, присущий конкретной композиции образца. В упругой зоне деформации образца перегрузка азотируемого слоя не столь значительна, поскольку определяется различием значений модуля упругости. Однако нагрузка на азотируемый слой резко возрастает при достижении в сердцевине образца напряжений, величины которых приближаются к показателю предела текучести при растяжении. Пластическая деформация сердцевины приводит к незначительному росту напряжений в ней и существенной перегрузке азотируемого слоя, а высокий уровень напряжений в азотируемом слое и практически отсутствие пластичности – к его хрупкому разрушению. Разрушение

хрупкого слоя сопровождается резким падением усилия, которое воспринимается сердцевинной образца. Перемещение траверсы приводит к деформации образца и повышению нагрузки на его сердцевину. При дальнейшем нагружении образца вследствие перемещения подвижной траверсы имеют место деформация и разрушение его сердцевины, представляющей исходный материал.

На диаграмме «усилие–деформация» азотированных образцов из стали 38Х2МЮА видна множественность хрупкого разрушения, происходящего почти при постоянной нагрузке. «Пилообразный» характер данной диаграммы, обусловлен, по-видимому, интересным феноменом разрушения хрупкого слоя, в котором трещина развивалась по спирали. Можно наблюдать также кольцевое разрушение азотированного слоя, после которого вся нагрузка воспринимается сердцевинной образца.

Диаграмма «усилие–деформация» стали 30Х3МА, представленная на рис. 3, демонстрирует более резкое и значительное падение уровня нагрузки, по сравнению со сталью 38Х2МЮА, обусловленное разрушением более толстого азотированного слоя, глубина которого в 1,5 раза превышает глубину слоя на образцах из стали 38Х2МЮА.

Разрушение азотированного слоя, как для образцов из стали 38Х2МЮА, так и для образцов из стали 30Х3МА, не означало потерю несущей способности. Несущая способность образца после разрушения азотированного слоя определяется прочностью материала сердцевины. Оценка площади вязкого разрушения сердцевины образцов позволяет определить напряжение разрушения материала сердцевины и сравнить с исходной прочностью стали.

Предел прочности сердцевины образца может быть определен как максимальное усилие, деленное на площадь образца неазотированной сердцевины. Однако следует отметить, что при анализе кривой деформации образца необходимо руководствоваться участком кривой, описывающей зависимость нагрузки от деформации после разрушения азотируемого слоя. Для образцов 1 и 2 из стали 38Х2МЮА и образца 1 из стали 30Х3МА максимальная нагрузка на образец достигается на кривой деформации образца без азотированного слоя. Для образца 2 из стали 30Х3МА достигнутая максимальная нагрузка на пике разрушения азотируемого слоя не рассматривается. Оценка прочности сердцевины данного образца проведена по максимальной нагрузке на ветви диаграммы «усилие–деформация», относящейся к деформации сердцевины образца. Величины максимальных усилий при разрушении сердцевины азотированных образцов и максимальных напряжений в сердцевине представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Напряжения разрушения азотированных образцов из сталей 38Х2МЮА и 30Х3МА**

Сталь	Условный номер образца	Максимальное усилие, Н	Площадь сердцевины, мм <sup>2</sup>	Максимальное напряжение в сердцевине, МПа
38Х2МЮА	1	16200	13,4	1210
	2	16400	13,1	1250
30Х3МА	1	17600	12,0	1470
	2	16600	10,1	1640

Анализ напряжений разрушения в азотированных образцах показывает, что значения напряжения разрушения значительно превышают показатели предела прочности сталей, представленные в технических условиях. Эффект повышения прочности улучшаемых сталей обусловлен спецификой их деформации в условиях объемного напряженного состояния [14–16]. Прочность образца с надрезом для сталей с прочностью на уровне 980–1200 МПа превышает прочность, реализуемую на гладком образце. При испытаниях образцов с азотированным слоем его разрушение формирует трещину, являющуюся наиболее резким концентратором напряжений. Высокотвердый поверхностный слой, ограничивая поперечные деформации, создает условия для плоской деформации материала сердцевины образца.

Несмотря на то, что испытания образцов с химико-термической обработкой не позволяют получить расчетные характеристики для оценки прочности деталей, в то же время они дают возможность оценить их несущую способность, опираясь на закономерности разрушения высокотвердого хрупкого слоя.

### Заключения

Испытания на растяжение образцов с высокотвердым хрупким слоем, формируемым в процессе химико-термической обработки, не позволяют получить расчетные показатели прочности, однако при этом появляется возможность оценки чувствительности материала к дефектам типа трещин.

Разрушение азотированного слоя образцов из сталей 38Х2МЮА и 30Х3МА имеет место при значении напряжения на уровне величин предела текучести этих сталей.

Стали 38Х2МЮА и 30Х3МА после термической обработки, определенной техническими условиями (закалка + отпуск при высокой температуре), не чувствительны к дефектам типа трещин.

### Библиографический список

1. Каблов Е.Н., Бакрадзе М.М., Громов В.И., Вознесенская Н.М., Якушева Н.А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
2. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. Киев: Техніка, 1970. 396 с.
3. Берлинер Э.М., Браун Э.Д., Чичинадзе А.В. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника). М.: Машиностроение, 2003. 576 с.
4. Яковлев Н.О., Селиванов А.А., Гулина И.В., Гриневич А.В. К вопросу о долговечности шарнирно-болтовых соединений // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 4 (61). С. 79–85. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-79-85.
5. Романенко Д.Н., Севальнев Г.С., Леонов А.А., Удод К.А., Степаненко Е.В. Повышение трибологических характеристик стали 18ХГТ после цементации и упрочняющей термической обработки // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). Ст. 02. URL: <https://journal.viam.ru> (дата обращения: 31.05.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-13-21.
6. Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов. М.: Металлургия, 1985. 256 с.
7. Каблов Е.Н. Становление отечественного космического материаловедения // *Вестник РФФИ*. 2017. № 3. С. 97–105.
8. Каблов Е.Н., Подживотов Н.Ю., Луценко А.Н. О необходимости создания единого информационно-аналитического центра авиационных материалов РФ // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2019. № 3. С. 28–34.
9. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность: справочное пособие / под ред. С.В. Серенсена. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1975. 488 с.
10. Лахтин Ю.М., Коган Я.Д. Азотирование стали. М.: Машиностроение, 1976. 256 с.
11. Фетисов Г.П. Материаловедение и технология металлов. М.: Высшая школа, 2001. 640 с.
12. Марочник сталей и сплавов / под общ. ред. Ю.Г. Драгунова, А.С. Зубченко. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2015. 1216 с.
13. Митраков О.В., Яковлев Н.О., Якушева Н.А., Гриневич А.В. Особенности разрушения стали 20ХГСН2МФА-ВД при испытании на вязкость разрушения // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 1 (54). С. 49–56. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-49-56.
14. Попов Л.Е., Конева Н.А., Терешко И.В. Деформационное упрочнение упорядоченных сплавов. М.: Металлургия, 1976. 256 с.
15. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. Киев: Наукова думка, 1976. 416 с.
16. Гриневич А.В., Лаптев А.Б., Скрипачев С.Ю., Нужный Г.А. Матрица прочностных характеристик для оценки предельных состояний конструкционных металлических материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 2 (51). С. 67–74. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-67-74.