

И.С. Татаркина

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ПЛАСТИЧНОСТИ СТАЛЕЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКОЙ

Проанализировано влияние различных способов поверхностной обработки на поведение изделий при растяжении и их механические свойства. Предложен новый способ повышения технологической пластичности холоднокатаных листовых сталей.

Ключевые слова: ионная бомбардировка, поверхность, прочность, пластичность, штампуемость, проба Эриксена.

Табл. 4. Рис. 3. Лит. 8

I.С. Татаркіна

ПРО МОЖЛИВІСТЬ ПІДВИЩЕННЯ ПЛАСТИЧНОСТІ СТАЛЕЙ ПОВЕРХНЕВИМ ІОННИМ БОМБАРДУВАННЯМ

Проаналізований вплив різних способів поверхневої обробки на поведінку виробів при розтяганні та їх механічні властивості. Запропоновано новий спосіб підвищення технологічної пластичності холоднокатаних сталей.

Ключевые слова: іонне бомбардування, поверхня, міцність, пластичність, штампувальність, проба Еріксена.

I. Tatarkina

ABOUT THE POSSIBILITY OF STEEL PLASTICITY INCREASING BY SURFACE ION BOMBARDMENT

The influence of various methods of surface treatment on the tensile test of items and their mechanical properties was investigated. The new method for increasing the technological plasticity of cold-rolled sheet steels was offered.

Key words: ion bombardment, surface, strength, plasticity, punch ability, Erichsen test.

Постановка проблемы. В настоящее время деформируемое твердое тело принято рассматривать как многоуровневую подсистему, а поверхность классифицировать как самостоятельную подсистему – особое состояние вещества. Именно поверхность играет определяющую роль в характере, месте и времени разрушения твердого тела [1, 2].

Проведенный литературный анализ свидетельствует, что состояние поверхностного слоя и его интерфейса с объемной подложкой определяет существенные отличия механизма и величины деформаций поверхностных и внутренних слоев металла, изменение вида диаграммы растяжения, характер разрушения.

Однако полученные результаты о влиянии состава, напряженного состояния, тонкой структуры поверхностного слоя на поведение исследуемых объектов при деформации довольно противоречивы и не имеют однозначных пояснений. Кроме того, существуют работы, в которых различие в поведении поверхностных и внутренних слоев материала не регистрируется [3, 4].

Такое состояние вопроса можно объяснить сложностью и многообразием влияния поверхностного слоя на характер деформирования материалов, выбором в качестве объектов изучения очень пластичных материалов с высокой релаксационной способностью, использованием косвенных методов исследования. Исследовались, главным образом, монокристаллы или микрообразцы из чистых металлов в виде проволоки и тонких лент.

Состояние поверхности можно изменить различными способами: поверхностной закалкой, химико-термической обработкой, интенсивной пластической деформацией, ультразвуковым и радиационным воздействием, нанесением покрытий, в том числе ионно-плазменных.

В современной промышленности ионно-плазменные покрытия широко используются для получения специальных эксплуатационных свойств поверхности (износостойкости, жаростойкости, уменьшения коэффициента трения и т.д.).

В технологии вакуумно-дугового осаждения (метод КИБ) обязательной предварительной операцией является ионная бомбардировка (ИБ) поверхности с целью ее очистки и улучшения адгезионного взаимодействия покрытия с подложкой. Однако известно, что ИБ изменяет тонкую структуру поверхностного слоя, шероховатость и напряженное состояние поверхности.

Это позволило нам рассмотреть ИБ как самостоятельную операцию, которая может существенно повлиять на эксплуатационные свойства изделий из конструкционных сталей.

Анализ последних исследований и публикаций. Изучено влияние модифицированных поверхностных слоев методами химико-термической обработки на поведение конструкционных сталей при растяжении. Показано, что чем меньше толщина упрочненного слоя, тем менее

проявляється охрупчивание материала [5]. В работах [6-8] было показано, что ИБ без нанесения покрытия повышает временное сопротивление σ_b на 17%, а условный предел текучести σ_{02} на 34%. При этом относительное удлинение δ сохраняется на достаточном уровне, а относительное сужение ψ (более репрезентативная характеристика, которая обуславливает надежность изделий) даже повышается. Надо подчеркнуть, что ни один из объемных методов обработки (гидроэкструзия, термомеханическая обработка, интенсивная пластическая деформация) не позволяет достичь столь значительного прироста показателей прочности при сохранении высокой пластичности ($\psi = 67$ и 68% в сталях 18ХГТ и 20Х соответственно). Авторы объясняют такое уникальное повышение конструктивной прочности образованием на поверхности изделия очень тонкого наноструктурного слоя, в котором реализуется бездислокационный механизм пластической деформации с проскальзыванием и поворотом зерен.

Нерешенные части проблемы. К настоящему времени обработка поверхности, в основном, все еще рассматривается как способ повышения конкретных специальных эксплуатационных характеристик. Что же касается влияния тонких поверхностных слоев на поведение при деформации массивных (приближающихся к реальным изделиям) образцов, то таких исследований очень мало. Не изучен вопрос влияния соотношений площади упрочненной поверхности к объему всего изделия на поведение детали под нагрузкой.

Представляет особый интерес изучение вопроса воздействия ИБ на технологическую пластичность холоднокатанных листовых сталей.

Цель данной работы – исследование влияния механической, химико-термической и ионной низкоэнергетической обработок на поведение стандартных образцов из широко распространенных конструкционных сталей при растяжении и на уровень их механических свойств, а также изучение возможности использования ИБ для улучшения деформируемости холоднокатанной автолистовой стали.

Основные результаты исследований. Изложены результаты влияния различных обработок поверхности на общие механические характеристики стандартных стальных образцов и их поведение при растяжении.

Механическая обработка. Исследованию подвергали образцы для испытаний на растяжение ($\varnothing 5$ и 10 мм) из отожженной стали 20 после шлифования, механического и электрохимического полирования. Основным контролируемым параметром выбрана характеристика шероховатости R_a отклонение профиля. Среднее значение R_a после шлифования составляло $1,6$ мкм, после механического полирования – $0,31$ мкм, после электрохимического полирования – $0,056$ мкм. На рис. 1 приведены диаграммы растяжения изделий после указанных видов обработок. Численные значения указаны в табл. 1.

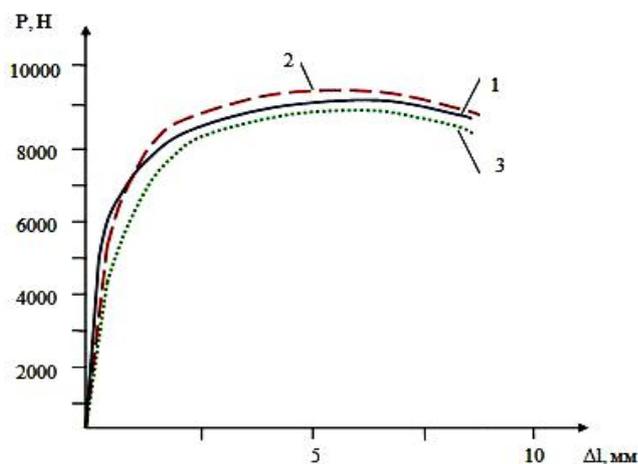


Рис. 1. Зависимость напряжение – деформация для образцов диаметром 5 мм из отожженной стали 20: 1 – шлифование; 2 – механическое полирование; 3 – электрополирование

Результаты свидетельствуют, что у образцов диаметром 5 мм механическое полирование, по сравнению со шлифованием, незначительно (на 4,5 %) повышает временное сопротивление. Электрохимическое полирование, наоборот, приводит к падению характеристик прочности. Аналогичная картина наблюдается и для образцов диаметром 10 мм. Характеристики

пластичності оставались неизменными вне зависимости от диаметра или поверхностной обработки.

Таблица 1. Результаты испытаний образцов из отожженной стали 20

Мех. обработка	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
Ø 5 мм				
Шлифование Ra = 1,6 мкм; HV ₅ = 122	455	255	33	64
Полирование Ra = 0,31 мкм; HV ₅ = 133	475	245	34	65
Электрохимическое полирование Ra = 0,056 мкм; HV ₅ = 103	445	230	33	64
Ø 10 мм				
Шлифование Ra = 1,6 мкм; HV ₅ = 122	460	260	32	64
Полирование Ra = 0,31 мкм; HV ₅ = 133	465	250	33	63
Электрохимическое полирование Ra = 0,056 мкм; HV ₅ = 103	455	245	33	63

Максимальная твердость поверхностных слоев регистрировалась после механического полирования (133 HV₅), минимальная – после электрохимического полирования – (103 HV₅), что можно объяснить наклепом поверхности при механическом полировании и снятии упрочненного слоя при электрополировке. Как результат, понижаются и твердость и прочность.

Небольшой прирост прочности после полирования объясним не только наклепом, но и резким снижением шероховатости. Однако даже относительно неглубокие царапины нивелируют эффект сглаживания микронеровностей, что поясняет большой разброс значений при испытаниях.

Подводя итоги проведенных экспериментов, следует отметить, что шероховатость поверхности и залечивание дефектов, имеющие место при электрополировке, являются второстепенными факторами, влияющими на поведение изделия под нагрузкой. Это подтверждается уменьшением характеристик прочности после электрохимического полирования, несмотря на разительное улучшение чистоты поверхности.

Стоит особо отметить, что разница в механических свойствах при различных видах механической обработки наиболее ярко выражена на образцах диаметром 5 мм, где соотношение площади поверхности к объему составляет 0,88 (у образцов диаметром 10 мм данный показатель составляет 0,44). Следовательно, это играет большую роль, если речь идет только о поверхностном воздействии на свойства изделия. Чем выше этот показатель, тем весомее обработка поверхностных слоев сказывается на поведении изделия в процессе эксплуатации.

Химико-термическая обработка. Азотирование. Испытанию на растяжение подвергали стандартные разрывные образцы (Ø 5 и 10 мм) из стали 40X после улучшения, а также улучшения и последующего азотирования на глубину 0,08, 0,25 и 0,35 мм. Диаграммы растяжения и протокол механических испытаний образцов приведены на рис. 2 и в табл. 2.

Из рис. 2 следует, что для стали 40X глубокие слои азотирования (0,25 и 0,35 мм) приводят к падению прочности, потере пластичности и охрупчиванию (кривые 3, 4). Азотирование на малую глубину (0,08 мм) несколько повышает прочность при сохранении пластичности (кривая 2), отвечающей уровню образца, не подвергнувшегося химико-термической обработке (кривая 1). Таким образом, азотирование на глубину $h \leq 0,08$ мм не снижает конструктивной прочности изделия.

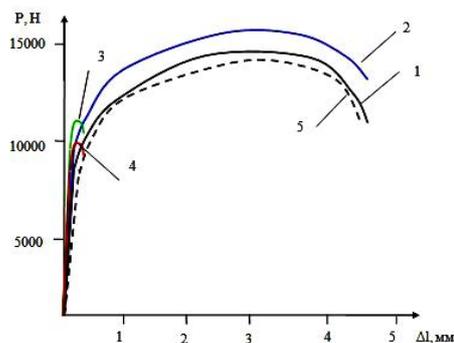


Рис. 2. Зависимость напряжение – деформация для образцов из стали 40X: 1 – 3+ВО; 2 – азотированный слой 0,08 мм; 3 – 0,25 мм; 4 – 0,35 мм; 5 – снятый слой

© И.С. Татаркина

Таблица 2. Механические характеристики образцов из стали 40Х после разной обработки

Толщина слоя азотирования, мм	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
Ø5 мм				
3 + ВО	715	435	19	52
0,08	780	465	19	49
0,25	535	—	—	—
0,35	475	—	—	—
Снятый слой	720	430	19	52
Ø10 мм				
3 + ВО	715	430	20	52
0,08	775	455	20	48
0,25	580	—	—	—
0,35	545	—	—	—
Снятый слой	715	425	21	51

После снятия азотированного слоя механические характеристики соответствуют показателям после улучшения (кривая 5).

Причины отличия в механических свойствах азотированных образцов диаметром 5 и 10 мм заключаются в различном соотношении площади упрочненных слоев к объему всего изделия. При упрочнении на незначительную глубину (0,08 мм) поведение при деформации и механические характеристики образцов практически совпадают.

Азотирование на глубину 0,25 мм приводит к потере пластичности как у образцов диаметром 5 мм, так и у образцов диаметром 10 мм. Падение характеристик прочности также наблюдается у обоих образцов, однако степень снижения отличается: 25% у образцов Ø 5 мм и 18% у образцов Ø 10 мм. При азотированном слое 0,35 мм у образцов Ø 5 мм σ_b снижается на 34% а у образцов Ø 10 мм – на 24%,.

Более резкое падение прочностных характеристик на образцах меньшего диаметра объясняется большим процентным соотношением поверхностного упрочненного слоя к объему изделия.

Обработка низкоэнергетическими ионами титана. С целью выяснения влияния ионной бомбардировки на конструктивную прочность изделий, были проведены испытания на растяжение плоских стальных образцов

Плоские образцы (200×20×1,2 мм) из отожженной стали 20 подвергались ИБ на установке «Булат-3т»по следующему режиму: $U = 900В$, $I = 95А$, $\tau = 30с$. Материалом катода был Ti. Энергия бомбардирующих ионов не превышала 3 кэВ.

О поведении плоских образцов из стали 20 при испытании на растяжение свидетельствуют кривые «напряжение – деформация», представленные на рис. 3. Из рисунка видно, что после ИБ одновременно увеличиваются и прочность, и пластичность. Их количественные характеристики приведены в табл. 3. Из таблицы следует, что при повышении $\sigma_{0,2}$ на 14 % δ возрастает на 76%, δ_p – на 81%, а ψ – более чем в 2 раза.

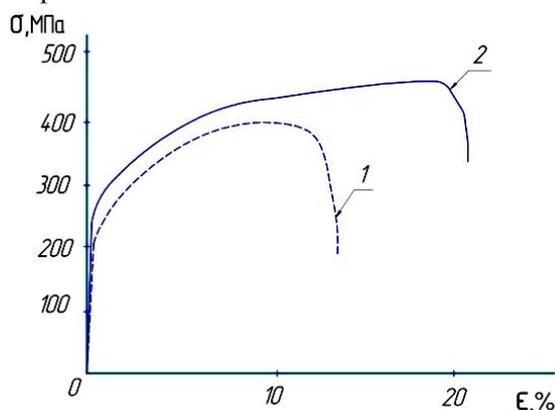


Рис. 3. Диаграммы растяжения плоских образцов: 1 – после отжига, 2– отжиг + ИБ

Таблиця 3. Результати испытаний плоских образцов на растяжение

Состояние	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	δ_p , %	ψ , %	HV ₅
После отжига	390	220	13	11	15	130-133
Отжиг + ИБ	425	250	23	20	39	125-132

Такое значительное повышение пластичности непременно должно сказаться на штампуемости стали. С этой целью были проведены исследования по изучению влияния ИБ на штампуемость холоднокатанной листовой стали 08кп. Сталь предназначена для изготовления способом холодной пластической деформации изделий весьма глубокой вытяжки (ВГ).

Согласно ГОСТ 9045-93 категорию весьма глубокой вытяжки для стали 08кп с толщиной листа 0,5 мм обеспечивает глубина сферической лунки при испытаниях на выдавливание по Эриксену равная 9,0 мм. Способность к особо сложной (ОСВ) и весьма особо сложной вытяжке (ВОСВ) предусмотрена для более пластичной термообработанной стали 08Ю с глубиной лунки 9,4 и 9,7 мм соответственно.

Нами была проведена односторонняя и двусторонняя бомбардировка листа из стали 08кп толщиной 0,5 мм низкоэнергетическими ионами Ti в атмосфере аргона. Результаты испытаний приведены в табл.4.

Таблиця 4. Результаты испытаний на выдавливание по методу Эриксона

Состояние	Глубина лунки	Способность к вытяжке
Исходное	9,15	ВГ
ИБ (одна сторона)	10,7	ВОСВ
ИБ (с двух сторон)	10,9	ВОСВ

После плазменной обработки ионами Ti на листе из стали 08кп получена категория вытяжки ВОСВ.

Выводы. Анализируя написанное выше, можно заключить:

1. Решающую роль в характере поведения образца при деформировании играет состояние поверхности. Экспериментально доказано влияние толщины упрочненного поверхностного слоя на поведение изделий при растяжении: чем больше толщина слоя, тем более явно проявляется охрупчивание материала.

2. Электрополирование, обеспечивающее уменьшение шероховатости поверхности и залечивание дефектов, не приводит к повышению характеристик пластичности изделия при деформации.

3. При азотировании на малую глубину (~ 0,8 мм) повышается прочность при сохранении высокой пластичности. Наличие азотированного слоя глубиной 0,25 мм приводит к снижению прочности, потере пластичности и охрупчиванию. Это явление более резко выражено у образцов Ø 5 мм по сравнению с образцами Ø 10 мм, что объясняется большим процентным соотношением площади упрочненного слоя ко всему объему изделия.

4. ИБ без нанесения покрытия является эффективным способом повышения конструктивной прочности и надежности изделий. Под влиянием ИБ $\sigma_{0,2}$ плоских разрывных образцов из стали 20 повысился на 14%, δ возросло на 76%, δ_p – на 81%, а ψ – более чем в 2 раза. Такая высокая пластичность в сочетании с повышенной прочностью не была достигнута ни одним из известных способов объемной обработки.

5. ИБ является простым и эффективным способом повышения штампуемости тонколистовых холоднокатаных сталей, предназначенных для изготовления изделий методами холодной деформации.

6. ИБ не изменяет металл в сердцевине изделия. Она радикально влияет на поведение изделия под нагрузкой, что в результате вызывает существенные изменения свойств детали в целом.

7. Эффект получения высокой конструктивной прочности изделий и деформируемости сталей обусловлен реализацией в поверхностном слое недислокационного механизма пластической деформации, в результате чего невозможно образование концентраторов напряжений при деформации и связанное с ним охрупчивание.

1. Панин В. Е. Эффект поверхностного слоя в деформируемом твердом теле / В. Е. Панин, А. В. Панин // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8. – № 5. – С. 7-15.
2. Панин А. В. Влияние состояния поверхностного слоя на механизм пластического течения и сопротивление деформации малоуглеродистой стали / А. В. Панин, В. А. Клименов, Ю. И. Почивалов // Физическая мезомеханика. – 2001. – Т. 4. – № 4. – С. 8592.
3. Andrade E. Surface Effects with Single Crystal Wires of Cadmium / E. Andrade, R. Randall // Nature. – 1948. – Vol. 162. – P. 890-891.
4. Gilman J. Surface Effects in the Slip and Twinning of Metal Monocrystals / J. Gilman // Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers. – 1952. – Vol. 194. – P. 875-883.
5. Дощечкина И. В. Влияние низкоэнергетической ионной бомбардировки на структуру поверхности и деформируемость тонколистовых низкоуглеродистых сталей / И.В. Дощечкина, И.С. Татаркина, ЮА. Сысоев // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні ресурсозберіжні матеріали та зміцнювальні технології», 06-08 червня 2012 р, Маріуполь, С. 202 -222.
6. Алехин В. П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов / Алехин В.П. – М.: Наука, 1983. – 280 с.
7. Смолякова Л.Г. Влияние структурного состояния поверхности молибденовой проволоки на характер кривых деформации / Л.Г. Смолякова, В.Ф. Терентьев // Физика и химия обработки материалов. – 1969. – №4. – С. 74-77.
8. Дяченко С.С. Підвищення конструктивної міцності виробів та деформівності сталей іонним бомбардуванням / С. С. Дяченко, І.В. Дощечкіна, І.В. Пономаренко, І.С. Татаркіна // Вісник національного університету «Львівська політехніка». – № 713 – Львів, 2011 – С. 166-170.

Стаття надійшла до редакції 25.04.2013.