

**В. Р. Назаренко**

Киев

**БУЛАТНАЯ СТАЛЬ**

*Разработан состав и технология получения булатной стали в лабораторных и промышленных условиях. Булатная сталь имеет износостойкость, которая не уступает износостойкости легированным сталям и может заменить их при изготовлении деталей, оснастки и инструмента. Булатная сталь освоена производствами ОАО «Днепроспецсталь» и ОАО «Запорожсталь» (г. Запорожье)*

**Ключевые слова:** булатная сталь, узор, шихта, сормайт, шарошка, износостойкость, «усы», конвертерная сталь, рафинировка, вуц

Основное назначение булата было изготовление оружия: клинков, сабель, мечей и ножей. Древние мастера считали, что внешние признаки (узор, цвет и звон) вполне определяют качество булата. Первые сведения о булате дошли до нас от участников походов Александра Македонского в Индию более 2300 лет назад.

Почему секрет производства булатной стали не дошел до наших дней? Этому способствовали: покорение Дамаска Тамерланом в начале 15-го столетия и вывозу всех мастеров по изготовлению булата; покорение Индии Великобританией, которая имела промышленное производство стали в то время как в Индии булатная сталь изготавливалась кустарным способом. Многие исследователи пытались и пытаются до сих пор восстановить древнюю технологию изготовления булатной стали. Наибольшего успеха в восстановлении производства булатной стали достиг российский металлург П. П. Аносов, который получил булат всех сортов сплавлением мягкого железа с графитом в закрытом тигле и при длительной выдержке. П. П. Аносов определил составляющие булата: «Железо и углерод и ничего более... Все дело в чистоте исходных материалов, в методе охлаждения и кристаллизации». Он утверждал, что булат содержит 1,0-5,0 % С [1]. Многие исследователи считали, что по технологии П. П. Аносова невозможно получить булатную сталь. Однако, автор статьи так же, как и великий русский металлург Д. К. Чернов, следуя указаниям П. П. Аносова, получил булатную сталь с прекрасными узорами [2, 3].

Первые две плавки, которые были проведены автором в 1965 г. на Харьковском турбинном заводе (ныне ОАО «Турбоатом») оказались неудовлетворительными. Потом еще были проведены плавки, но успеха не было достигнуто. С 1970 г. автором проводились плавки в Институте проблем материаловедения НАН Украины (ИПМ), где было все: шихта, плавильные печи, кузнечный молот, прокатные станы, хорошо оснащенные механический цех и исследовательская база. Плавки булатной стали проводились в печах сопротивления,

Таммана и индукционной. В качестве шихты применялись древесный уголь и карбонильное, губчатое и армо-железо. Было проведено 160 плавков, чтобы получить желаемый результат: механические свойства, микро- и макроструктуру, а главное — узор, который сравнивался с узорами других авторов, опубликованных в прессе [4]. Но тогда стояла конкретная задача. В связи с тем, что в тот период было разработано много легированных сталей и сплавов, которые удовлетворяли все потребности производства и науки, а изделия из булатной стали не имели спроса, было решено испытать возможность внедрения булатной стали в производство, помня о том, что изделия из булатной стали сохраняли остроту лезвия после длительного использования их в работе, то есть булатная сталь имела высокую износостойкость [5]. Кроме того, были испытаны лезвия из булатной стали на Московском заводе «Дорхиммаш» объединения «Пластик» при резке пленки из полиэтилентерефталата толщиной 3 мкм. Лезвия из булатной стали в 12 раз дольше стояли, нежели лезвия из стали 65Х13 (типа «Спутник» или «Нева») при лучшем качестве резания [6]. До этого в ИПМ были проведены работы по выплавке, деформированию и термической обработке булата. Особенно деформирование булата с содержанием углерода более 2,0 % затруднено вследствие низкой пластичности, что обусловлено наличием в структуре эвтектики, образующейся на базе крупной карбидной фазы Fe<sub>3</sub>C. Применяя изложенный в работе [7] метод, в большинстве случаев не имели положительного результата, хотя использовали все рекомендации: всестороннее сжатие, небольшие скорости деформации ( $10^{-2}$ - $10^{-5}$  с<sup>-1</sup>), малые температурыковки (ниже температуры плавления карбидов железа), подвергали заготовки (слитки) предварительной тепловой обработке, которая повышает пластичность в результате увеличения плотности дислокаций в карбидах до  $10^6$ - $10^7$  мм<sup>-2</sup>, а также приводит к созданию полигональной структуры. Такая обработка включает в себя многократные нагревы и охлаждения. Но и при этих условиях обработки мы не получили стопроцентного выхода поковок. Автором было проанализировано со-

держание химических элементов в булатной и дамасской сталях. Было определено, что в большинстве случаев стали не имели или имели очень мало кремния и марганца. Начали обращать внимание на недопущение содержания марганца и кремния в булатной стали. С этого периода можно было деформировать булатную сталь с содержанием (в %): С — 2,1; 3,38; 5,0 и 6,0; Si — до 0,1; а Mn — до 0,12, используя рекомендации, изложенные в работе [7]. Автор [8] отмечает, что марганец и кремний повышают предел текучести феррита и уменьшают его пластичность. Марганец образует стабильный карбид, изоморфный цементиту и понижает его способность к деформированию. Кремний, взаимодействуя с кислородом, образует монооксид кремния (фактор охрупчивания).

Таким образом, имея положительные результаты испытания булата при резке пленки, отработанную технологию выплавки и деформирования булатной стали, приступили к получению булата в производственных условиях, когда автор работал в отделе профессора Ларикова Л. Н. Института металлофизики НАН Украины. Плавку проводили в однотонной индукционной печи завода «Большевик» (г. Киев). Как шихту использовали отходы производства завода порошковой металлургии (г. Бровары, Киевская обл.) – окатыши 0,8-5,0 мм и древесный уголь, которые тщательно перемешивали и загружали в тигель печи. На дно тигля загружали (30 % от необходимого количества) свежееобожженную при температуре 1050 °С известь и плавиковый шпат китайского производства, просушенный при температуре 600 °С. Остальное количество извести и плавикового шпата загружалось в печь вместе с шихтой. Тигель печи накрывался специальной крышкой для создания условий проведения плавки в углеродно-восстановительной атмосфере. Металл выливали из печи в изложницы вместе со шлаком (две изложницы по 500 кг каждая), минуя ковш, что устраняло повторное окисление — насыщение металла газами ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2$ ) из воздуха. Было выплавлено четыре плавки с содержанием (%) С — 1,05; 1,07; 1,27 и 2,40. Слитки булата с содержанием 1,05 и 1,07 % С перековали на заготовки-поковки и были направлены заводам-заказчикам для испытания булата непосредственно в промышленных условиях. Заводами были изготовлены штампы холодной штамповки, ножи для резки лавсановой пленки, обработки древесины, порубки проволоки, пуансоны для высадки головки гвоздей, молоточки для обувной промышленности и другие изделия, а также испытаны вместе с легированными сталями, сплавами и наплавочными материалами. Испытания изделий из булатной стали показали, что булат превосходит легированные стали в несколько раз. Так, например, при обработке супесчаной почвы фрезерными культиваторами ножи из булата в 3 раза дольше обрабатывали почву, нежели ножи из стали 65Г с наплавкой режущей части ножа сормайтотом, который имеет 30-35 % легирующих элементов. При холодной штамповке заготовок из стали У8А толщиной 0,16 мм с твердостью 40-45 HRC штамп из булат-

ной стали дольше использовался, нежели штамп из стали X12M в 2,2 раза при меньшем количестве переточек. Шарошки для взъерошивания кожи в обувной промышленности изготавливаются лишь из стали P18, сплава ВК15 или вольфрамовых сталей, другие стали не используются — не стоят. А шарошки из булатной стали с 1,35 % С не поступали шарошкам из вольфрамовых сталей и сплавов. Можно еще приводить примеры, но и этих достаточно, чтобы показать преимущество булата над легированными сталями [9].

Булатная сталь промышленного изготовления испытана на механические свойства, износостойкость, свариваемость и другие свойства. Из слитка с содержанием 2,4 % С были получены поковки. Другой слиток был испытан на макроструктуру, серные отпечатки по Бауману. Испытание показало, что слиток из булатной стали имел лишь две зоны кристаллов — столбчатых и равноосных, а зоны мелкозернистой корки не имел (рис. 1). Объясняется это тем, что булатная сталь не имеет легирующих элементов и марганца, и нет условий образования зародышей, которые служат началом быстрой кристаллизации. Сера в слитке размещена равномерно без образования «усов» потому, что нет марганца и не образовалось соединение MnS, рис. 2 [10]. При обработке булатной стали отмечено, что инструмент и само изделие в процессе обработки покрывалось темной пленкой. Сначала предположили, что это следы масла, ко-

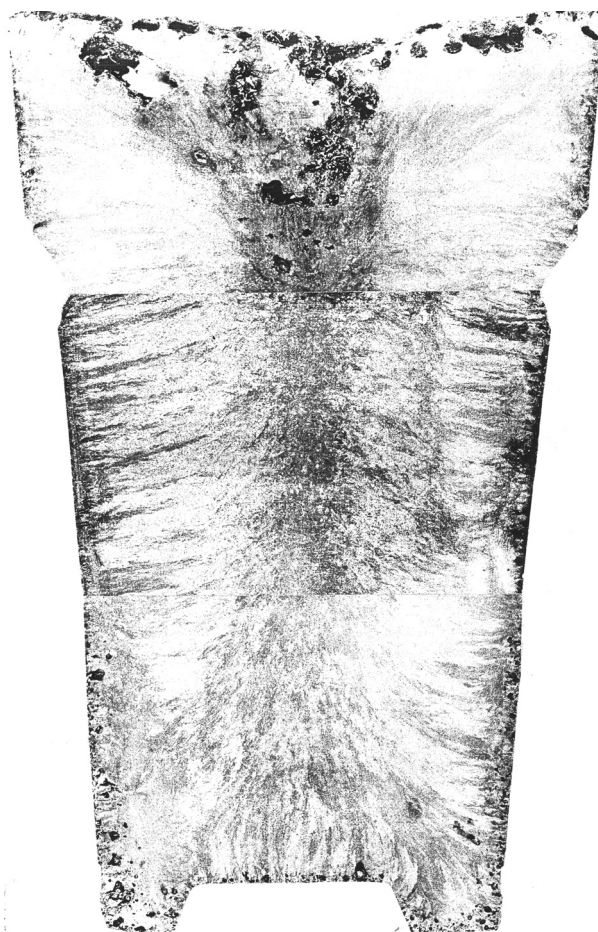
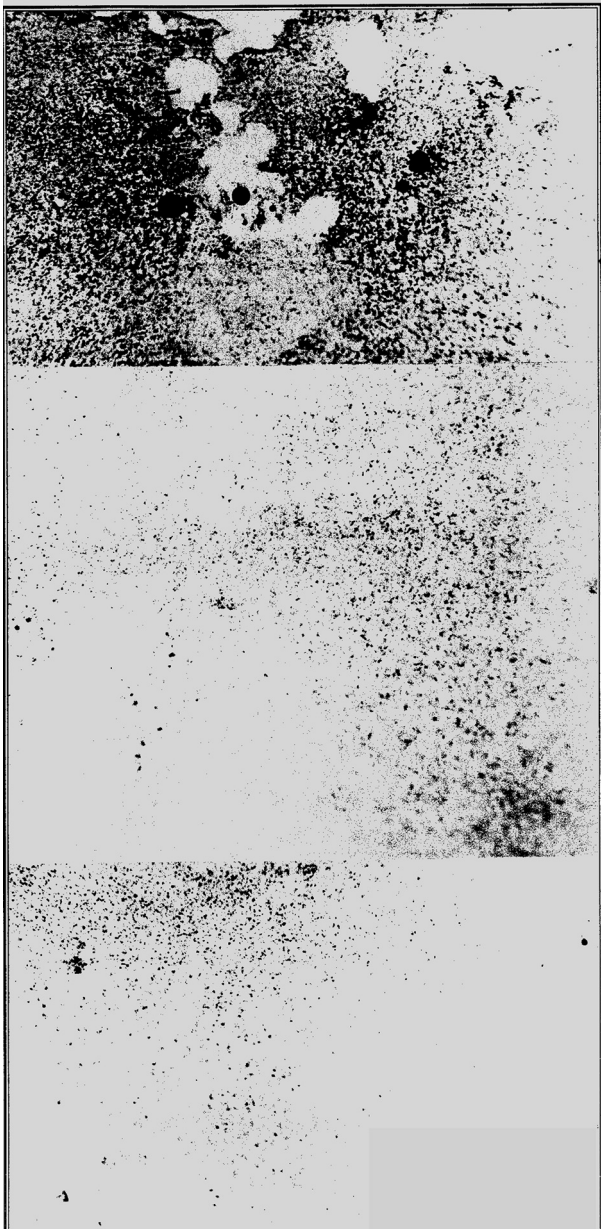


Рис. 1. Кристаллическая структура слитка булатной стали с содержанием углерода 2,4 %





**Рис. 2.** Отпечаток по Бауману слитка из булатной стали с содержанием 0,022 % S

торое добавляется к инструменту. Но тщательная проверка убедила в ошибочности суждения. Потом предположили, что булат имеет свободный углерод. Исследование подтвердило это предположение. Откуда и почему булатная сталь с малым содержанием кремния имеет графит? Еще в 1943 г. автор [11] пришел к выводу, что графит в стали может появляться в результате длительной механико-термической обработки, включая: плавление, раскисление стали алюминием, охлаждение слитка, ковку при низких температурах с многократным нагревом, термическую обработку и, в конце-концов, нагрев заготовок в газовых печах. Такому ходу процесса способствовало то, что растворимость углерода как в  $\alpha$ -, так и в  $\gamma$ -железе в стабильной системе при равновесии с графитом меньше, чем в метастабильной системе при равновесии с карбидом железа. Следовательно, определяющим для графитизации служит, во-

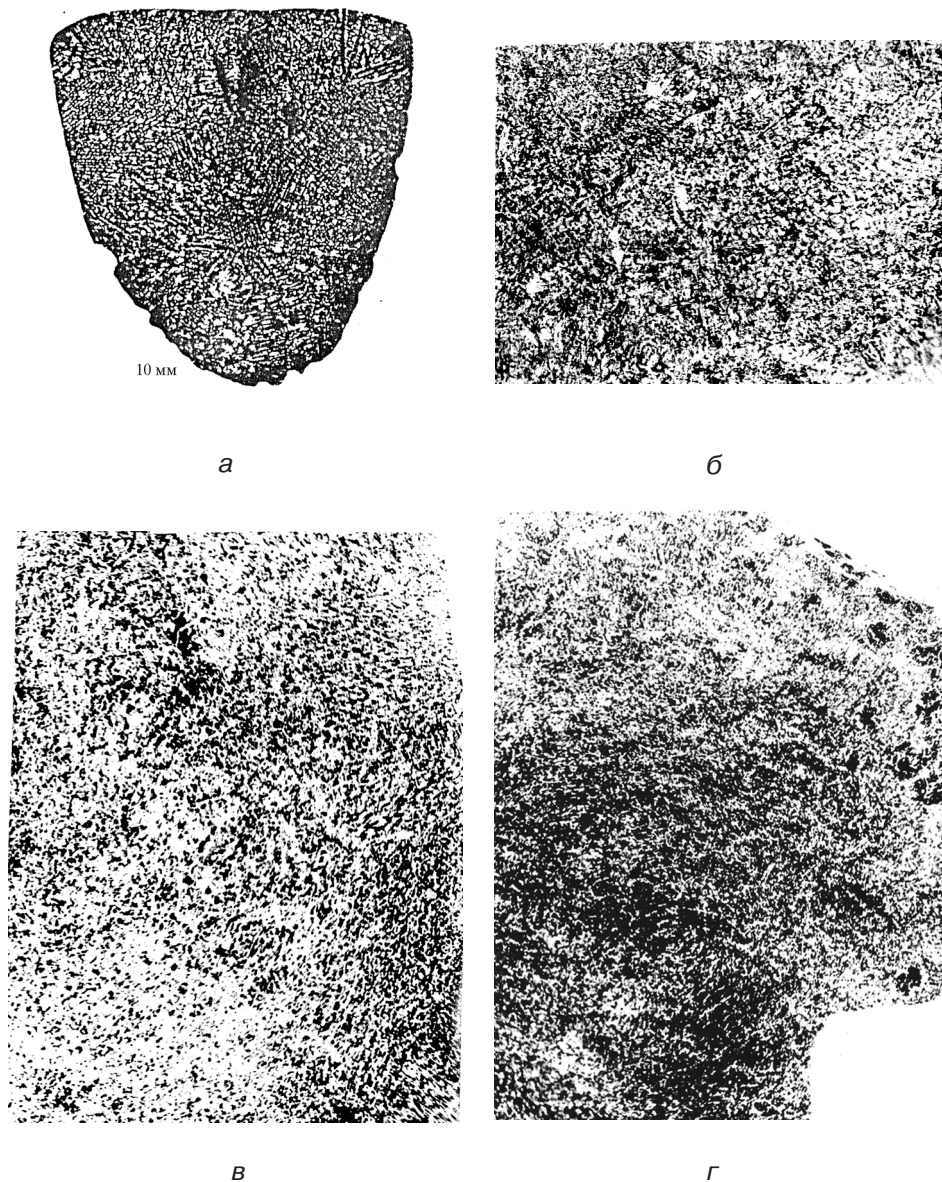
первых, образование зародышей графита, и, во-вторых, незначительное различие в свободной энергии между карбидом и графитом. Таким образом, склонность к графитизации зависит от устойчивости карбидов и условий образования зародышей графита. Сделали предположение, что износостойкость булатной стали зависит не только от микроструктуры (мягкой матрицы), которая удерживает мелкие частицы цементита (0,1-3,0 мкм), но и от того, что графит служит смазывающим материалом поверхностей трения, скольжения и качания испытывающей пары. Наши предположения подтвердились исследованиями. Кроме того, при сверлении отверстий, шлифовании изделий инструмент, скользя по поверхности изделия, не исполнял своей функции. Объясняется это тем, что булатная сталь имеет высокую вязкость.

Для внедрения изготовления булатной стали на металлургическом заводе мы обратились в ОАО «Днепроспецсталь» (г. Запорожье). Плавку проводили в электродуговых сталеплавильных печах емкостями 10 и 30 т. В качестве шихты использовали особо чистую конвертерную сталь по ТУ 14-1-1490-75. Перед снятием окислительного шлака в металле было % 0,10 Mn и 0,014 P. Раскисление шлака в период рафинировки осуществляли без использования ферросилиция. Конечное раскисление проводили в ковше. Температура металла в ковше была 1550-1560 °С. Металл разливали в изложницы сифоном и покрывали слоем экзосмеси. Слитки массой 3,6 т передавали в прокатный цех горячим всадом. Способы выплавки обеспечивают состав и чистоту металла, возможность обработки на прокатных станах.

Булатная сталь, изготовленная на ОАО «Днепроспецсталь», была испытана на механические свойства, которые были на уровне механических свойств стали У12 (химический состав булатной стали по углероду соответствовал 1,05-1,25 (%), обезуглероживание, неметаллические включения, закаливаемость и прокаливаемость. Но главное испытание было проведено на машиностроительных заводах Украины – на износостойкость, которая соответствовала износостойкости стали, изготовленной на заводе «Большевик» (г. Киев). Единственное, чего не получили в булатной стали – узор, потому что прокатка осуществлялась при температуре 1210-850 °С (булатная сталь деформируется при температуре 850-650 °С), при которой карбиды железа растворяются в матрице металла и не образуют узоров [12]. Поэтому эту сталь назвали сталью булатного типа. ОАО «Днепроспецсталь» обозначил ее У12Б, где буква «Б» означает булат. Чтобы прокатать лист толщиной до 7 мм, обратились в ОАО «Запорожсталь», где положительно восприняли наше предложение и прокатали листы толщиной 5,0 и 6,5 мм. Таким образом, ОАО «Днепроспецсталь» и ОАО «Запорожсталь» освоили изготовление булатной стали и могут удовлетворить потребности машиностроительных заводов и тех организаций, которые используют износостойкие легированные стали.

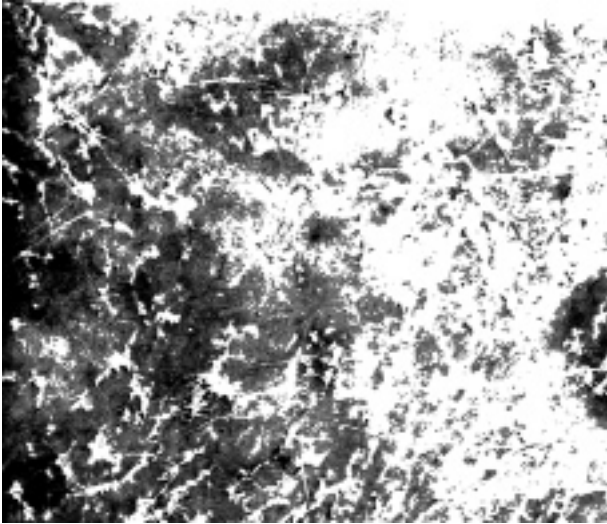
Заканчивая статью, автор хотел бы отметить, что вправе заявить о том, что действительно получена булатная сталь, которая отвечает всем требованиям булата. Так, например, макроструктура слиточков, полученных в лабораторных условиях с содержанием (%) 1,23, 2,27 и 3,10 С (рис. 3, б-г) отвечает макроструктуре слиточка индийского вуца (рис. 3, а). Кроме того, полученные узоры отвечают узорам древних мастеров (рис. 4). Узоров на изделиях стали булатного типа ОАО «Днепроспецсталь» не имеем (рис. 5). Необходимо отметить,

что эта сталь по макро- и микроструктуре превосходит булатную сталь в связи с тем, что она имеет значительно мельче зерно с равномерным распределением углерода по всему объему металла, что не всегда соблюдается в булатной стали. Если учесть, что для промышленных деталей, оснастки и инструмента не обязательно иметь узоры, а по износостойкости эта сталь не уступает (а в некоторых случаях и превосходит легированные стали), то необходимость применения ее в промышленности не вызывает никаких сомнений [13].

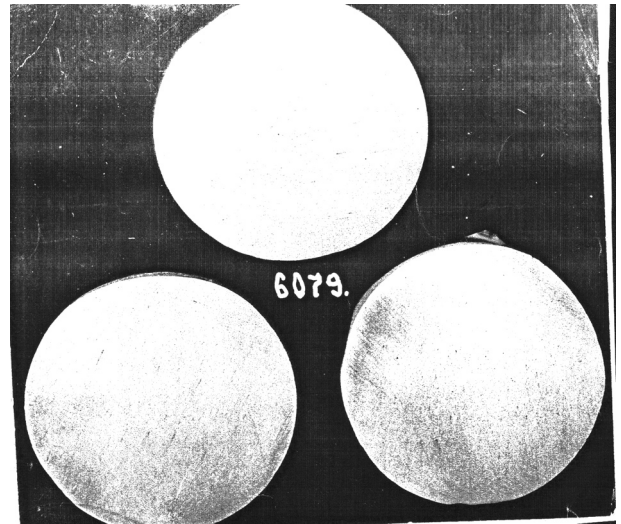


**Рис. 3.** Макроструктура слиточков : индийского вуца —  $\varnothing$  40 мм, Н — более 40 мм (а); с содержанием (%) С — 1,23 (б), 2,27 (в), 3,10 (г)





**Рис. 4.** Узор булатної сталі з содержанием углерода 1,95 %



**Рис. 5.** Макроструктура сталі булатного типу ОАО «Днепрспецсталь»



#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аносов П. П. Собрание сочинений. – М.: Изд-во АН СССР, 1954. – 143 с.
2. Чернов Д. К. Избранные труды по металлургии и металловедению. – М.: Наука, 1983. – С. 324-326.
3. Назаренко В. Р., Бондаренко Л. И., Янковский В. Ф. и др. О технологии производства булатной стали // Металловедение и терм. обработка металлов. – 1989. – № 9. – С. 58-61.
4. Назаренко В. Р., Янковский В. Ф., Долгинская М. А., Яковенко П. М. Булат: мифы и действительность // Там же. – 1992. – № 6. – С. 32-37.
5. Назаренко В. Р. Изучение структуры и свойств булатной стали // Литейн. пр-во. – 1986. – № 7. – С. 4-5.
6. Назаренко В. Р., Бондаренко Л. И., Янковский В. Ф., Долгинская М. А. и др. Второе рождение булатной стали // Металлург. – 1988. – № 1. – С. 37-39.
7. Нижниковская П. Ф. Структура и пластичность железоуглеродистых сплавов заэвтектического типа // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1984. – № 9. – С. 5-9.
8. Лариков Л. Н. Булат: минуле і сучасне // Металознавство і термічна обробка металів. – 1995. – № 2. – С. 58-63.
9. Назаренко В. Р. Булат, сталь булатного типу і мої переживання. – Київ-Черкаси: «Інлес», 2003. – С. 196-198.
10. Назаренко В. Р. Особливість булатної сталі // Клинок. – 2007. – № 2. – С. 54-63.
11. Гудремон Э. Специальные стали. Т. 1. – М.: Гос. изд-во по черн. и цв. металлургии, 1959. – С. 473-477.
12. Назаренко В. Р., Кийко Г. В., Казаков С. С. и др. Друге народження булатної сталі в Україні // Інформатизація і нові технології. – 1996. – № 4. – С. 22-24.
13. Назаренко В. Р. О булате и его применении в народном хозяйстве // Кузнечно-штамповочное пр-во. – 1986. – № 4. – С. 39-41.

### НАЗАРЕНКО В. Р. Булатна сталь

*Розроблені склад і технологія одержання булатної сталі в лабораторних і промислових умовах. Булатна сталь має зносостійкість, яка перевищує зносостійкість легованих сталей і може замінити їх при виготовленні деталей, оснастки та інструменту. Булатна сталь освоєна виробництвами ВАТ «Дніпрспецсталь» і ВАТ «Запоріжсталь» (м. Запоріжжя).*

### NAZARENKO V. Damascus steel

*The resulting composition and technology of Damascus steel laboratory and industrial conditions. Damascus steel has a durability that is not inferior to the durability of alloyed steel, and can replace them in the manufacture of parts, accessories and tools. Damascus steel production of JSC «Dneprospetsstal» and JSC «Zaporizhstal» (Zaporozhe).*