

Игорь Таганов

Закат легенд о булате

Короткая эпоха производства булата в Индии и Персии, расцвет которого пришёлся на годы правления персидских шахов Аббаса I (1587-1629) и Сафи (1629-1642), оставила потомкам много технологических загадок и необычных легенд. Историков оружия и коллекционеров до сих пор волнуют легенды об особой прочности булатных клинков, «которые одинаково легко разрубают и подброшенную в воздух шёлковую чалму, и камни крепостных стен».

Все легендарные достоинства булатных клинков традиционно связывались с красотой, гармоничностью и высокой контрастностью узоров на клинке. Например, П.П. Аносов так определял булат: «Булатом называется сталь, имеющая узорчатую поверхность; на некоторых булатах узор виден непосредственно после полировки, на других – не прежде, как поверхность его подвергнется действию какой-либо слабой кислоты (вытравке)...азиатцы полагают: чем крупнее, явственнее узор, тем выше достоинство металла». На Востоке и по сей день, определяя цену клинка, судят о качестве булата по узору.

Долгое время одной из загадок булата считалось чрезвычайное разнообразие узоров на булатных клинках (подробнее см. И. Таганов, В. Иванов, А. Нечаев «Загадка узоров булата», «КАЛАШНИКОВ» №4/2007). Например, в 1960-е годы один из авторов этой статьи насчитал в реставрационных мастерских и на базарах Дамаска, древнего центра торговли дорогим оружием, более двадцати различных узоров на клинках – от слегка волнистых «шамов» («сирийских», фото 1, 2) до богатого разнообразия «персидских сеток» (фото 3, 4, 5).

Самыми ценными на Востоке считают контрастные, почти чёрные, «кара-хоросаны» и «кара-табаны» со

сложными сетчатыми «персидскими» узорами (фото 5, 6). Персидские сетчатые узоры являются и самыми распространёнными, украшая более 80 % всех клинков в музейных собраниях. На клинках с «персидской сеткой» узор образован замысловатым переплетением групп светлых линий на тёмном фоне с золотистым отливом, перемежающихся со структурами типа ониксов и плетей, напоминая бурный поток, стремящийся по клинку.

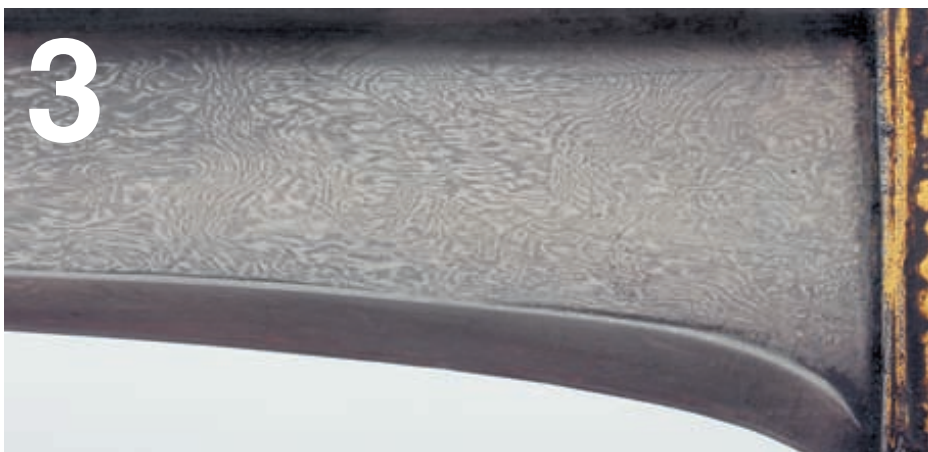
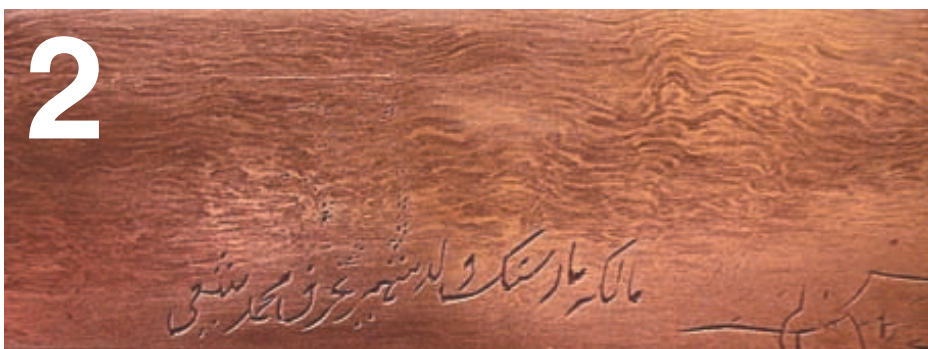
К этому типу булатов относятся и булаты с узором «зуль факар» («многоколенчатый»), для которого характерны чередующиеся одиночные или двойные поперечные структуры линий в узоре, напоминающие ступени лестницы на клинке (фото 6, 7, 8).

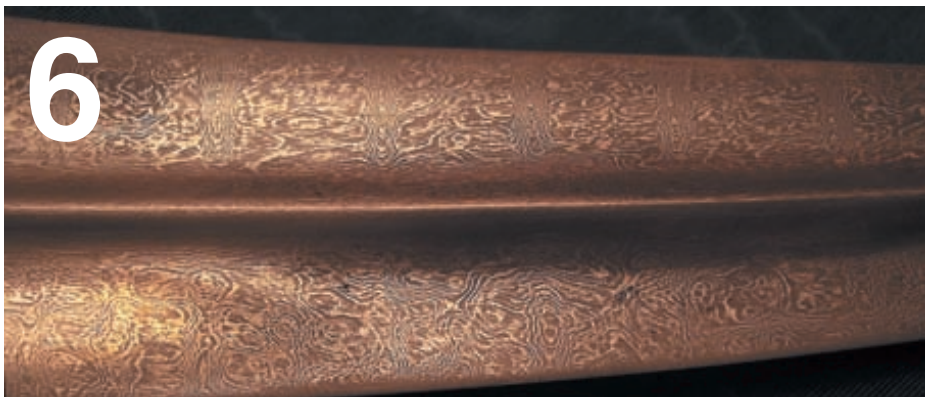
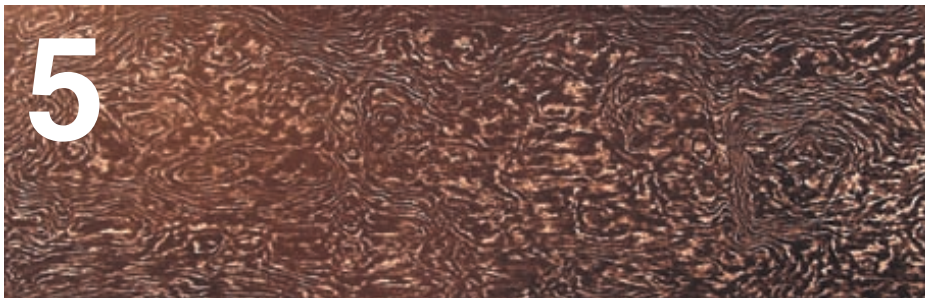
Клинки с двойными поперечными структурами или с «розами» в узоре (фото 9, 10) особенно ценятся на Востоке и их часто называют «Кирк Нардубан» («Сорок Ступеней» или «Лестница Мухаммеда»).

Начавшиеся в 1990-е годы металлографические исследования булатных клинков дали неожиданные результаты. Оказалось, что если протравить поперечный или продольный срез булатного клинка, то вне зависимости от того, каким узором он украшен, обнаружится одна и та же характерная слоистая структура (фото 11).

Слоистая макроструктура булатного клинка сложена регулярно чередующимися, почти параллельными боковым плоскостями клинка, слоями достаточно однородного металла матрицы толщиной от 30 до 100 мкм и слоями металла, обогащённого конгломератами частиц цементита, толщиной от 15 до 35 мкм. Конгломераты цементита (светлые частицы на фото 11, 12) в этих слоях встречаются разной формы – от округлых диаметром 5-10 мкм до продолговатых с отношением осей 2/5 (фото 12). Типичную слоистую структуру булата недавно обнаружили и при исследовании клинка П. П. Аносова 1841 года из «русского булата» с узором «шам».

Таким образом, булат оказался двухкомпонентным железо-углеродным композитом с регулярной слоистой структурой с плотностью 30-50 слоёв на мм. Узор же булатного





клинки – это только элегантное украшение и не слишком прочная декорация на поверхности толщиной всего в несколько десятых миллиметра. В это трудно поверить, рассматривая булатные клинки в витринах музеев. Но те, кому приходилось своими руками перебирать на Востоке коллекции булатных клинков разной степени сохранности, быстро в этом убеждались.

Приёмы создания узоров на булате некогда относились к особому жанру кузнечного искусства, ныне почти забытому. При исследовании булатов важно понимать, что один и тот же булатный клинок со слоистой макроструктурой описанного типа, может быть украшен совершенно разными узорами – от элегантного, серебристого, слегка волнистого «шама» до круто завитой сетки почти чёрного «кара-табана».

Оружейники ковали клинок не сразу в форме клина, а сначала с прямоугольным сечением и только на завершающем этапе клиновидный профиль и боковые плоскости клинка формировались опилкой этой прямоугольной поковки. При этом параллельные боковым поверхностям прямоугольной поковки слои частиц цементита пересекали боковые плоскости клинка под углом, определяя контрастность и выразительность будущего узора (см. фото 11).

Ширина светлых линий и контрастность узора булата определяется толщиной слоёв h , обогащённых цементитом, которая пропорциональна среднему содержанию углерода C в булате: h (мкм) = $15C(\%)$. Содержание углерода в матрице булата C_m , которое также пропорционально среднему содержанию углерода в булате, оценивается соотношением: $C_m = 0,5C$. Поскольку среднее содержание углерода в булатах обычно составляет от 1 до 1,8 %, то содержание углерода в металле матриц в соответствии с этой формулой изменяется от 0,5 % до 0,9 %. Разница в содержании углерода в матрицах и в высокоуглеродистых слоях структуры булата порядка 3 %, намного превышает этот показатель для типичных дамасских сталей (0,7-1 %), что, в частности, и способствует повышению контрастности узора на булате.

Чем шире высокоуглеродистые слои в булате и чем больше содержание углерода в матрице, тем контрастнее и выразительней узор на булатном клинке, так что узор служит достаточно надёжным индикатором среднего содержания углерода в булате. Но является ли большое содержание углерода в булате гарантией его высоких боевых качеств?

В последние два десятилетия в США и России были проведены исследования химического состава более 20 индо-персидских булатных клинков XVII столетия. Оказалось, что булаты являются сверхвысокоуглеродистыми сталями («сталистыми чугунами») с содержанием углерода от 1 до 2 % (типичное содержание 1,5-1,7 %) с незначительным природным легированием. Новым результатом этих исследований явилось открытие необычно большого содержания фосфора в булатах



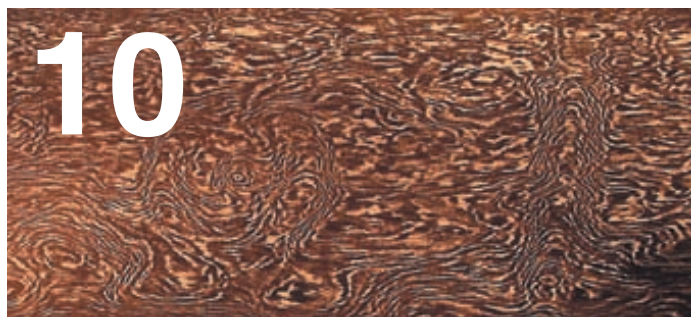
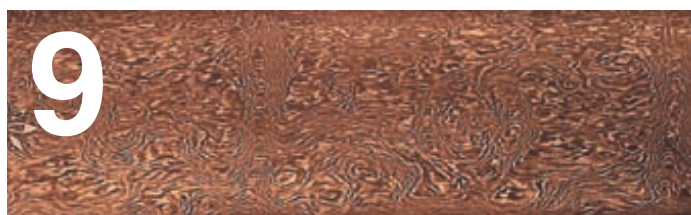
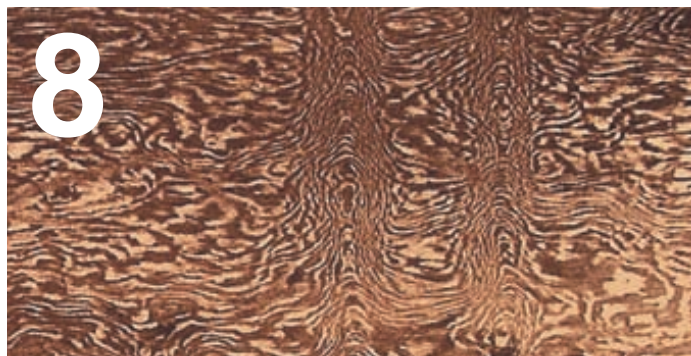
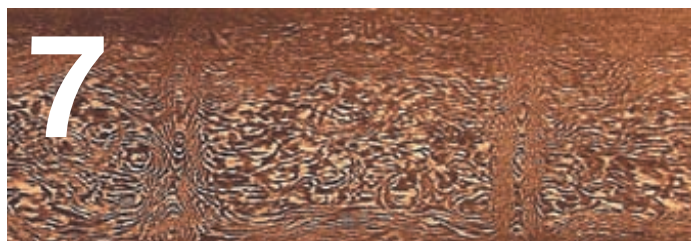
(подробнее см. И. Таганов, Б. Калинин, А. Нечаев «Тайное клеймо Люцифера на булате», «КАЛАШНИКОВ» №3/2009). Содержание фосфора в булатах в 5-10 раз превышает концентрацию этого элемента в современных инструментальных и конструкционных углеродистых сталях, составляя обычно от 0,07 до 0,15 % и имеет тенденцию возрастать на величину порядка 0,01 % при увеличении концентрации углерода на каждые 0,1 %.

Фосфор, как и сера в литом и деформированном металле снижают пластичность и особенно ударную вязкость при нормальных и низких температурах. Вредное влияние фосфора определяют следующие его свойства. Фосфор образует сегрегации, которые формируют сетку на границах первичных аустенитных зёрен, приводя к ослаблению межкристаллических связей. Кроме того, являясь примесью внедрения, фосфор заметно искажает кристаллическую решётку твёрдого раствора и повышает неустойчивость аустенитной фазы в дефектах кристаллической решётки, тем самым заметно снижая работу развития трещин.

С увеличением содержания углерода быстро возрастает отрицательное влияние фосфора на пластичность металла. Так, при повышении концентрации фосфора с 0,02 % до 0,1 % в стали с 0,35 % углерода, ударная вязкость металла снижается в 3-4 раза, а такое же увеличение содержания фосфора в стали с 0,8 % углерода снижает ударную вязкость уже в 5-7 раз. При концентрации свыше 0,05 % фосфор значительно ухудшает физико-механические свойства сталей, повышая их хрупкость и снижая ударную вязкость металла. Кроме того, фосфор в сталях образует стеадит – хрупкую трёхкомпонентную фосфидную эвтектику с низкой температурой плавления (около 970°C). Поэтому при содержании фосфора свыше 0,12 % большинство сталей становятся не только хрупкими, но и «красноломкими», рассыпаясь при попытке их ковать. Об этом хорошо знали опытные кузнецы, никогда не бравшиеся перековывать старые булатные клинки.

Мы провели исследование основных физико-механических характеристик булатов с различными средними содержаниями углерода и фосфора (в таблице соответственно С и Р). В нашем исследовании мы использовали образцы типичных булатных клинков, собранные экспедициями Русского Географического общества: «тальявары» (индекс «Т» в таблице) – вид самого распространённого в Индии в XVI-XIX веках слегка изогнутого меча с относительно широким клинком; «шамширы» (индекс «Ш») – столь же популярный в Индии и Персии тип боевого меча, отличающийся от тальвара большей изогнутостью и меньшей шириной клинка.

Испытания проводились в лаборатории «Исследование и моделирование структуры и свойств металлических материалов» СПб ГПУ. Для определения микротвёрдости структур булата использовался прибор Vickers Micromet 5103, а для средней твёрдости по Викерсу (HV) Zwick/Roel ZHU (нагрузка 10 кг). Для испытаний на разрыв при определении напряжения начала текучести S(T), удлинения и напряжения разрыва S(B) использовались призматические образцы булата с рабочей шейкой 10x2x1,5 мм и скоростью деформации 0,3 мм/мин на машине «Точприбор» ИР 5040-5. Оценка



ударной вязкости (KCU-испытание) проводилась на копре Zwick/Roell RKP450 для образцов 55x5x4 мм с U-образным надрезом глубиной 1 мм. Напряжение разрушения при изгибе S(M) для образцов булата 25x5x2 мм, нагружавшихся по центру между двумя опорами, разнесёнными на 10 мм, определялось на машине Zwick/Roell Z100. Результаты испытаний приведены в таблице.

В качестве образцов для сравнения были приняты близкие к булатам по содержанию углерода промышленные инструментальные стали У8А, У12 и специально сваренный металл, соответствующий по составу стали У16. Все эти металлы перед изготовлением образцов для испытаний прошли кузнечную обработку с коэффициентом деформации 12-15 и последующим охлаждением на воздухе.

Как видно из таблицы малая твёрдость булатов соответствует отпущенному при высокой температуре закалённому высокоуглеродистому металлу. Металлографический анализ образцов подтверждает это, поскольку

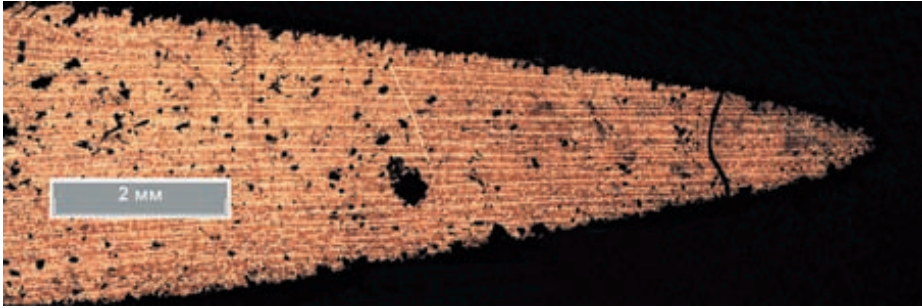


Фото 11. Слоистая макроструктура булата (образец Ш-3)

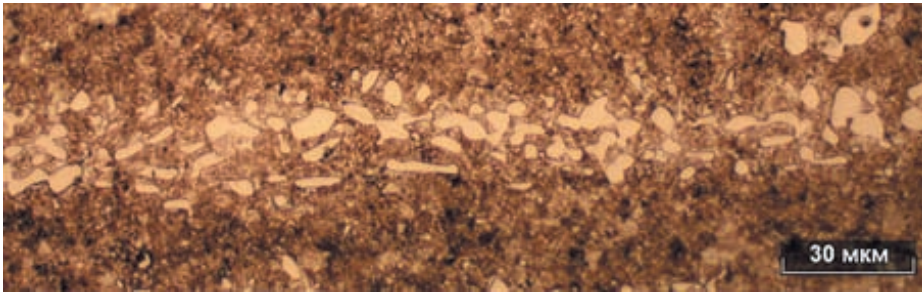


Фото 12. Слой конгломератов цементита в булате (образец Ш-3)



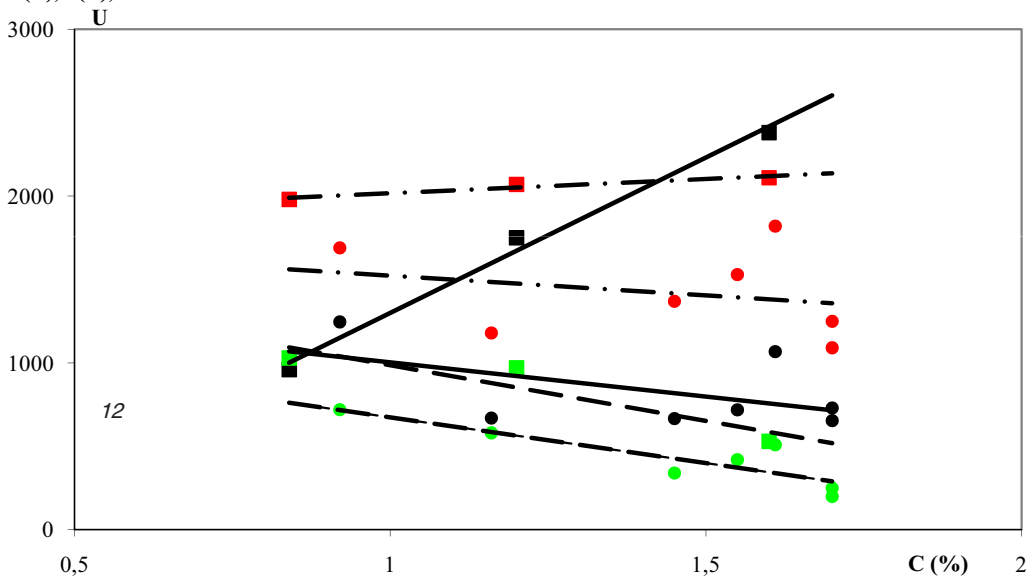
типичными структурами металла матриц булатов являются перлит или бейнит со значительной примесью феррита. Такие структуры можно получить высоким (более 600°С) отпуском закалённого в воде или масле металла. Персидская литература XVIII века вполне это подтверждает, неоднократно упоминая об одном или нескольких отпусках булатных клинков после закалки при температурах «когда сухая деревянная щепка вспыхивает, касаясь клинка» (это как раз температура 600-650°С).

Причина, из-за которой булатные клинки не использовали закалёнными с низкотемпературным отпуском понятна – при высоких содержаниях фосфора, характерных для булатов, после такой термообработки клинки ломались бы как стеклянные. Что же касается остроты лезвия, то чрезвычайная острота даже незакалённых булатных клинков обеспечивается пачкой слоёв, обогащённых цементитом с твёрдостью HRC=70, формирующих лезвие клинка (см. фото 6). Такие группы высокоуглеродистых слоёв, перемежающиеся со слоями относительно мягкого металла матриц, создают на лезвии булатного клинка своеобразную «микро-пилу», способную к самозаточке.

Напряжения разрушения булатов при разрыве S(B) составляют всего 30-80 % (в среднем 50 %) от соответствующих значений характеристик однородных высокоуглеродистых инструментальных сталей. То же можно сказать и о критических напряжениях при изломе S(M): для булатов они едва достигают 70 % значений этих характеристик для однородных инструментальных сталей. Ударная вязкость (KCU – испытание) булатов почти в 2 раза меньше значений этой характеристики для однородных инструментальных сталей.

Легенды, как и мифы, необыкновенно живучи и читатели ещё долго будут встречать рассказы о несравненной прочности клинков из булата. Но счастливым владельцам булатных клинков никогда не следует испытывать свои сокровища на прочность. Например, попытки срубить шляпку забитого в стену подковного гвоздя, как это некогда делали brave гусары Златоустовскими саблями и шашками, всегда

S(B), S(T), 100KC



На этом рисунке физико-механические характеристики булатов из табл. 1 представлены кружками, а характеристики однородных промышленных инструментальных сталей квадратами. Сплошные линии это тенденции зависимостей напряжений разрушения при разрыве S(B) от среднего содержания углерода. Штрих-пунктирные линии это тенденции зависимостей напряжений разрушения при изгибе S(M) от среднего содержания углерода в металле, а пунктирные линии это тенденции зависимостей ударной вязкости (в масштабе 100КСУ) от среднего содержания углерода

заканчиваются либо переломом булатного клинка, либо, в лучшем случае, безобразной вмятиной на его лезвии.

На легендарном способе оценки качества булатного клинка по его узору следует остановиться особо. Как уже отмечалось, чем толще линии узора и больше контраст узора и фона, тем обычно выше среднее содержание углерода в булате. Если бы в булатах не было бы столь высокой концентрации фосфора, то при возрастании содержания в них углерода их прочность бы действительно несколько возрастала. Но как видно из таблицы и рисунка 1 при высоком содержании фосфора возрастание концентрации углерода в булате приводит не к упрочнению, а к прогрессирующему снижению его физико-механических характеристик. Поэтому большей прочностью обладают булаты не с выразительным узором на почти чёрном фоне, а бледно-серые клинки с деликатным, едва различимым узором, свидетельствующим об относительно малом содержании углерода в металле. Такие клинки, кроме того, допускают иногда и умеренную закалку лезвия. Примером такого «светлого» булата в нашей коллекции является образец Т-5.

Таким образом, высокоуглеродистый булат со значительным содержанием фосфора, применявшийся для

клинков в Индии и Персии в XVI-XVII веках, представляет собой мягкий и хрупкий металл, почти вдвое уступающий по основным физико-механическим характеристикам современным промышленным инструментальным сталям с таким же содержанием углерода. Это низкое качество металла, вероятно, и явилось главной причиной повсеместного прекращения производства индо-персидского булата в XVIII столетии, когда сотни кузнецов-оружейников в Индии и Персии вдруг неожиданно, как будто сговорившись, «забыли» все секреты его производства. Булат навсегда останется великолепным памятником средневекового оружейного искусства Востока, но, любуясь узорами булатных клинков в витринах музеев, оружейники должны помнить, что по современным стандартам этот красивый металл является бракованной фосфористой сталью, негодной даже для производства гвоздей.

В заключение считаю своим приятным долгом поблагодарить Николая Колбасникова, Олега Зотова, Василия Мишина за помощь в написании материала, а также А. Нечаева и М. Свиткина за большую помощь при подготовке к испытаниям образцов булата, а также А. Наумова за помощь при проведении механических испытаний. ☺

Таблица 1. Физико-механические характеристики булатов (обозначения образцов соответствуют статье И. Таганов, Б. Калинин, А. Нечаев «Тайное клеймо Люцифера на булате», «КАЛАШНИКОВ» №3/2009)

	Образец	C	P	HV	HRc	S(T) (МПа)	S(B) (МПа)	Удлинение (%)	KCU (Дж/см ²)	S(M) (МПа)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	T-1	1,55	0,12	331	35	634	719	10	4,2	1530
2	T-2	1,70	0,045	360	38	-	654	-	2,0	1090
3	T-3	1,45	0,028	350	37	-	667	-	3,4	1370
4	T-4	1,16	0,052	240	24	640	670	8	5,8	1180
5	T-5	0,92	0,093	443	44	1140	1245	18	7,2	1690
6	Ш-1	1,70	0,19	372	39	710	730	4	2,5	1250
7	Ш-3	1,61	0,13	459	45	-	1068	-	5,1	1820
8	Среднее	1,44	0,094	365	37	781	822	10	4,3	1418
9	У8А	0,84	0,007	368	38	888	960	6	10,3	1980
10	У12	1,2	0,008	326	34	-	1750	-	9,7	2070
11	(У16)	1,6	0,01	387	40	-	2380	-	5,3	2110