

Игорь Таганов

# Загадочный предок дамасской стали

Часть 2

*Сегодня мы предлагаем вашему вниманию заключительную часть материала, посвящённого так называемому «чёрному булату». Первая часть статьи была опубликована в журнале «КАЛАШНИКОВ» № 4/2010.*

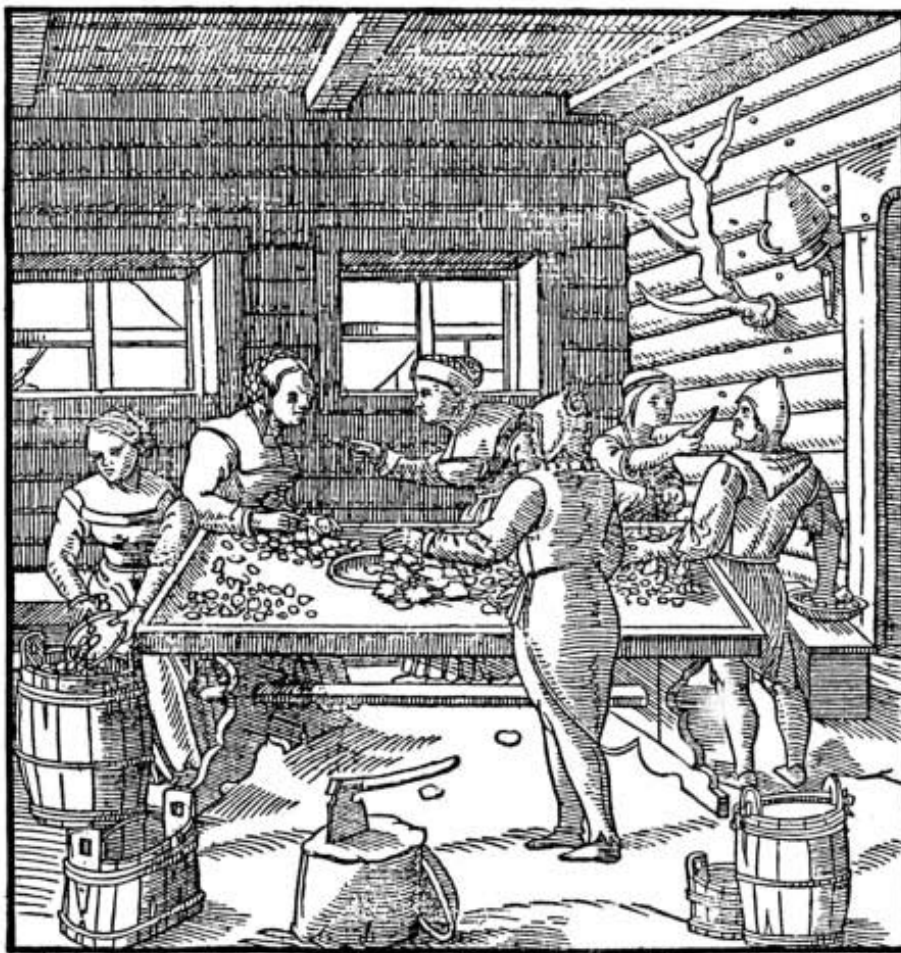


**Д**ревняя технология выплавки железа, которой пользовались в первом тысячелетии до нашей эры потомки хеттов фригийцы в Малой Азии, а вслед за ними античные греки и кельты, достаточно хорошо изучена по археологическим находкам. Пористая железная крица, образовавшаяся после длительного нагрева при температуре обжига керамики (1150–1250°C) смеси железной руды, древесного угля, песка, соли и дроблёных морских раковин, сначала отжималась от шлака проковкой каменным молотом. Мастера тех давних времён не умели подбирать оптимальное сочетание температурного режима и длительности процесса восстановления железной руды, качество которой к тому же бывало разным. Поэтому, как показали исследования найденных археологами образцов, железные крицы были очень неоднородны по содержанию углерода. В разных частях крицы содержание углерода могло меняться от 0,1 % до 3,5 %.

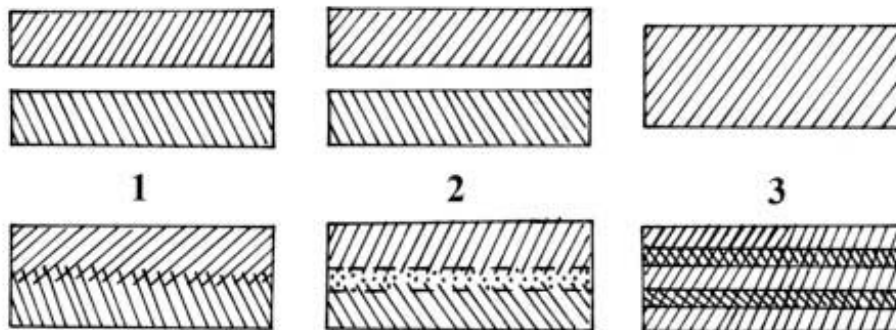
Для того чтобы выделить «ковкое железо» выплавленная крица вновь раскалялась, а затем окатывалась холодной водой. При ковке такой закалённой крицы её высокоуглеродистые, хрупкие части откалывались, образуя так называемое «кусковое железо». Повторяя этот процесс несколько раз, мастера постепенно разделяли неоднородную крицу на «ковкое» и «кусковое» железо. Тщательная сортировка кусков дроблёной стали по содержанию в них углерода была важным металлургическим процессом, которым занимались жёны и дочери металлургов (ил. 1).

В античной Греции использовалось несколько терминов для железа и стали, в числе которых самый древний – это «адамас» Гесиода, который употреблял слово «адамас» с прилагательными «седой» или «серый», описывая этот оружейный металл в своей «Теогонии»: «61. мгновенно создала она [Гей-Земля] род серого железа – адамас 162. изготовила огромную косу...316. Её [Гидру] сын Зевса [Геракл] убил седым адамасом...».

Вслед за Гесиодом словом «адамас» пользовались Пиндар, Геродот, Платон и Плутарх. Из греческого языка это слово перешло в латынь



Ил. 1. Сортировка «ковкого» и «кускового» железа в средние века

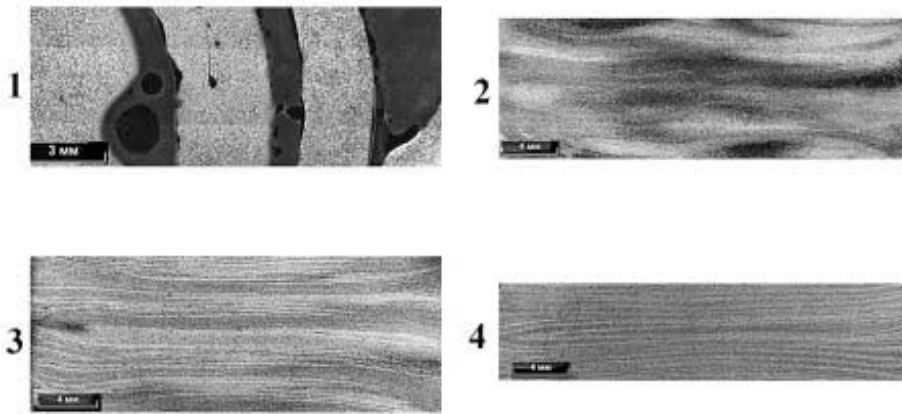


Ил. 2. Классификация архаичных технологий слоистых железо-углеродных композитов: 1 – экзофазная технология, формирующая межкристаллические связи слоёв в процессе высокотемпературной объёмной деформации металла; 2 – технология дамасской стали, в которой слои металлов соединяются прослойками феррита; 3 – эндофазная технология индо-персидского булата, формирующая обогащённые цементитом слои за счёт «внутреннего» углерода в сплаве

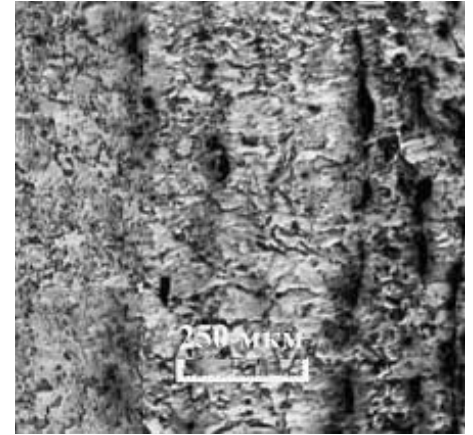
как adamas и применялось для обозначения железа, стали и вообще очень твёрдых субстанций. Позже, превратившись в adamant, это слово стало употребляться в английском, французском и даже русском языках, как синоним алмаза. Гесиод пользовался термином «адамас» для

оружейного металла в IX веке до н. э., то есть за пять столетий до Аристотеля, описавшего технологию античной стали «халипса».

Современники Гесиода на заре истории металлургии в Малой Азии и на островах восточного Средиземноморья применяли особую технологию



Ил. 3. Макроструктура металла на разных стадиях формирования экзофазного булата



Ил. 4. Макроструктура «адамаса» («чёрного булата») II-I веков до н. э.

приготовления стали в кузнечном горне. Прокованный лист пластичного железа покрывался слоем смеси дроблёного среднеуглеродистого и высокоуглеродистого, нековкого «кускового железа» с добавлением флюса. Затем этот лист скатывался в рулон, образуя своеобразный железный «рулет» с начинкой из смеси кусков стали, чугуна и железа. Этот рулет проковывался в полосу при относительно высокой, «сварочной» температуре в 1250-1350°С. Откованная полоса прокаливалась некоторое время в горне под слоем глины, а затем ещё несколько раз обрабатывалась молотом. Прокаливание позволяло за счёт диффузии несколько выровнять концентрацию углерода по сечению полосы, хотя слоистая структура металла всё же сохранялась. Слоистая структура «адамаса», характерная также для дамасской стали, и стала поводом для превращения со временем термина «адамас» в «дамаск».

Древнерусская технология производства «уклада», восходящая, возможно, к архаичной скифской металлургии и не встречающаяся больше нигде в мире, заслуживает того, чтобы на ней остановиться особо. Производство уклада можно было ещё увидеть кое-где в глухих углах России даже в начале XIX века, где его изучал и подробно описал французский путешественник Фулон. Уклад готовили из прокованной (чтобы отжать шлаки) заготовки сырцового железа в форме каравай круглого хлеба. Заготовка прокаливалась в горне под слоем угля в таком режиме, при котором поверхностные слои заготовки интенсивно насыщались углеродом. После быстрого охлаждения заготовки замороженным расолом, науглероженные слои заготовки легко отбивались молотом в форме хрупких корок закалённой стали. Отбитые корки разбирались на два сорта: крупные и толстые из среднеуглеродистой стали и мелкие, тонкие из высокоуглеродистой. Крупные корки из среднеуглеродистой

стали собирали в прямоугольный блок («парегу»), обвязанный для прочности железной проволокой, а щели, присыпанные флюсом, заполняли измельчёнными корками высокоуглеродистой стали. Многократные проковки пареги, завёрнутой в толстый лист ковкого железа завершали процесс производства уклада. Сам древнерусский термин «уклад» и происходит от характерного приёма «укладывания» стальных корочек в пачку (парегу).

Изменяя химический состав металла, которым заполнялись щели в пареге, на Руси получали различные сорта уклада. Русское название булата – «красный уклад» – даёт повод предположить, что способ производства булата на Руси был одной из модификаций традиционной технологии уклада (см. И. Таганов и др. «Русский булат – «красный уклад». «КАЛАШНИКОВ» № 5/2007). Щели пареги, сложенной из листов среднеуглеродистой стали, заполнялись не высокоуглеродистой сталью, а чугуном. После прогрева до температуры размягчения чугуна и нескольких обработок молотом получалась поковка двухфазного неоднородного металла, как раз с разностью концентраций углерода в металлических фазах порядка 3 % характерной для индо-персидских булатов. Если щели в пареге заполнялись металлом, легированным никелем при тигельном восстановлении железа из смеси железной руды и дроблёного метеорита, то получался один из сортов хоролуга (см. И. Таганов и др. «Хоролуг – боевая сталь древних славян». «КАЛАШНИКОВ» № 4/2002).

Русский уклад в Европу купцы обычно привозили на английских и шведских кораблях, что и давало повод называть его «английской» или «шведской» сталью. Уклад высоко ценился оружейниками Европы, которые в Германии и Франции называли его Gerfalcon (кречет), потому что



после осторожного травления поверхность этой несколько неоднородной стали обнаруживает бледно-серые полосы, похожие на полосы на груди ястреба или охотничьего кречета. Экспорт уклада в Европу был особенно интенсивен в царствование Ивана Грозного и архивы московских приказов свидетельствуют, что производили его во многих местностях. Особенно часто упоминаются московские, тульские и устюженские уклады.

В способах производства «уклада» и «адамаса» используется общий принцип «экзофазной» металлургической технологии – получение неоднородного композита среднеуглеродистой и высокоуглеродистой стали или чугуна, в котором межкристаллические связи металлических фаз образуются в процессе длительной высокотемпературной объёмной деформации (ил. 2.1), а не с помощью слоёв феррита, формирующихся во время импульсных кратковременных перегревов областей контакта полос металла при кузнечной сварке дамасской стали (ил. 2.2).

Экзофазная технология принципиально отличается и от способа производства индо-персидских булатов в XVI-XVII веках. Большинство металлургов основной узор индо-персидских булатов считает слои цементитной сетки, образующиеся при кристаллизации и специальной термообработке сверх-высокоуглеродистых сталей. Причём основным механизмом формирования скоплений цементита в этом булате является преимущественная кристаллизация вторичного цементита в междендритных областях, обогащённых «третьими элементами»: P, Mn, Si, и т. д. Третьи элементы, концентрируясь при затвердевании слитка за счёт ликвации в междендритном пространстве, снижают там скорость роста кристаллов на каждом цикле нагрева и охлаждения при ковке. Это способствует формированию развитой поверхности зёрен в междендритном пространстве и стимулирует кристаллизацию цементита, что и приводит к селективному накоплению там крупных цементитных кластеров, формирующих обогащённые цементитом слои в булате (ил. 2.3). Такой механизм формирования слоистой структуры булата можно называть «эндофазным», поскольку кластеры цементита формируются за счёт «внутреннего» углерода в сплаве.

Оказалось, что использование в древнем мире экзофазных способов получения неоднородных железо-углеродных композитов имеет даже письменные исторические свидетельства. В XI веке хорезмийский учёный Мухамед Ибн Ахмед Абу-Рейхан Бируни кратко описал принцип экзофазного процесса производства булата в Афганистане

и Западной Индии: «Сталь по своему составу бывает двух сортов: когда в тигле плавится нармохан [железо] и «вода» его [чугун] одинаковым плавлением и они оба в нём соединяются так, что не различимы один от другого..., [другой сорт] получается, когда в тигле [они] плавятся неодинаково и между ними не происходит совершенного смешения. Отдельные частицы их располагаются вперемешку, но каждая ясно видна по особому оттенку. Называется фаранд [одно из арабских названий булата и булатного узора]».

Изучение экзофазных процессов получения неоднородных композитов проводится с 2006 года исследовательской группой в составе: автора статьи, кузнецов В. А. Иванова и С. А. Гарбара, доцента В. П. Карасева и профессора А. А. Казакова. В качестве компонентов с низкой концентрацией углерода применяются промышленные стали (0,1-0,3 % C). Для высокоуглеродистой составляющей используется специально сваренный чугун с содержанием углерода 3-3,5 %.

Собранная из чередующихся слоёв стали и чугуна заготовка, дважды проковывалась по особой технологии в диапазоне температур 1250-1000°C. Макроструктура поковки на этом этапе представлена на ил. 3.1. В этой начальной стадии процесса поковка сформирована чередующимися слоями стали со структурами феррита и перлита, и слоями чугуна со структурой ледобурита. На этом этапе толщина слоёв очень неравномерна и слои чугуна, а также поверхности контакта слоёв изобилуют кавернами, микро- и макротрещинами, а также прослойками окислов. Однако несколько последующих высокотемпературных ковок (1250-1000°C) «залечивают» все трещины и каверны, а прослойки окислов на границах с чугуном восстанавливаются до металла (ил. 3.2, 3.3). Дальнейшая вытяжка поковки в полосу при температуре ковки 1150-1000°C не только уменьшает средний поперечный размер слоёв, но и выравнивает их толщину (ил. 3.4). Выравнивание толщины, вероятно, объясняется тем, что степень деформации слоёв при такой ковке, оказывается в среднем пропорциональной их толщине.

Продолжение кузнечной обработки для достижения плотности в несколько десятков слоёв на миллиметр формирует в металле равномерную слоистую структуру. Но, как видно из ил. 3.4, между слоями экзобулата не образуются прослойки феррита, которые снижают физико-механические характеристики дамасской стали. Например, после





закалки в зоне контакта слоёв обнаруживаются обычные закалочные структуры углеродистой стали. Такие же структуры обнаружены и в немногих исследованных образцах чёрного булата (ил.4).

Экзофазная технология слоистых композитов обладает особым механизмом термоупругого упрочнения металла. При температуре термопластичной деформации  $T = 1250-1350^{\circ}\text{K}$  коэффициенты термического расширения  $\alpha$  (1/град) среднеуглеродистых и высокоуглеродистых сталей заметно различаются. Например, коэффициенты термического расширения для стали с 0,3-0,5 % С и стали с 1-1,2 % С имеют значения:  $\alpha_1 = 1,5 \times 10^{-5}$  1/град и  $\alpha_2 = 1,9 \times 10^{-5}$  1/град соответственно. При остывании слоистого композита до нормальной температуры эта разность коэффициентов термического расширения приводит к возникновению в металле термоупругих напряжений, величина которых оценивается формулой:  $S = E(\alpha_1 - \alpha_2) \times (T - T_0)$ .

Для рассматриваемого примера при среднем модуле упругости металла порядка  $E = 200$  ГПа эта формула даёт оценку  $S = 800$  МПа. Учёт реальной макроструктуры слоистого композита приводит к некоторому снижению приведённой оценки. Тем не менее, эффект термоупругого упрочнения слоистых композитов оказывается впечатляющим. Так, предел разрушения при растяжении мягкого листового слоистого железо-никелевого композита порядка 500 МПа начинает превышать 1200 МПа в состоянии термоупругого напряжения.

Термоупругие напряжения, создаваемые границами слоёв, не могут релаксировать за счёт пластической деформации, обусловленной перемещением зернограницных дислокаций. Поэтому металл в состоянии термоупругого напряжения не

теряет своей прочности при механической обработке, закалке и отжиге. Релаксация термоупругих напряжений может происходить только за счёт медленных диффузионных процессов, например, при длительном высокотемпературном отжиге с последующим медленным охлаждением с печью.

Исследование прочности наших экспериментальных экзобулатов показало, что композиты со средним содержанием углерода 1,6-1,8 %, закаляются в воде от  $8000^{\circ}\text{C}$  до твердости HRC 62-64. Образцы, отпущенные на воздухе при  $4000^{\circ}\text{C}$  до твердости HRC 48-52, имели предел прочности при разрыве 1450-1650 МПа с относительным удлинением 6-8 %. Эти характеристики вполне сопоставимы со стандартами для высококачественных легированных сталей и намного превосходят физико-механические характеристики дамасских сталей (см. табл. в прошлом номере журнала).

Двухфазные структуры экспериментальных полос экзобулата сформированы чередующимися слоями стали с различным содержанием углерода. Соотношение объёмов низкоуглеродистой и высокоуглеродистой фаз примерно 1:1, при разности концентрации углерода в фазах – порядка 3 %. Эти соотношения характерны и для индо-персидских булатов. Использование на завершающей стадии металлообработки приёмовковки, разработанных в технологии индо-персидского булата и дамасской стали, позволяет сформировать на поверхности экспериментальных поковок элементы узоров, типичные для многих сортов старого восточного булата (ил. 5).

В заключении считаем своим приятным долгом поблагодарить Е. И. Казакову и Л. С. Чигинцева за большую помощь при проведении металлографических исследований.



Ил. 5. Элементы типичных узоров старых восточных клинков, воспроизведённые на образце лабораторного экзобулата