

УДК 621.77:669.14.018.27

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ПАТЕНТИРОВАНИЕМ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЯЧЕКАТАНОЙ СТАЛИ 40X

Филиппов А.А., Пачурин Г.В., Кузьмин Н.А.

ФГБОУ ВПО Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Нижегород, e-mail: PachurinGV@mail.ru

В автомобильной и целом ряде других отраслей промышленности широко используются высокопрочные болтовые соединения, являющиеся одним из наиболее массовых видов деталей машин. В работе исследованы прочностные и пластические свойства исходного горячекатаного проката для холодной объемной штамповки метизных изделий и деформированного обжатием с разными степенями (5, 10, 20, 30, 40 и 60%) с последующим патентированием в условиях выдержки в селитровой ванне в с разной температурой (370, 400, 425, 450 и 550°C). Показано, что исходная микроструктура горячекатаного проката состоит из «перлита + феррита». Такие образцы выдерживают испытания осадкой до 1/2 высоты первоначального образца. Применение термической операции патентирования при температуре селитровой ванны (400, 425, 450 и 550°C) приводит к появлению в стали 40X микроструктуры «сорбит патентирования». При этом образцы выдерживают испытания осадкой до 1/3 высоты первоначального образца. При температуре же селитровой ванны 370°C, образцы выдерживают осадку лишь 1/2 от первоначальной высоты образца.

Ключевые слова: горячекатаный прокат, селитровая ванна, структура, волочение, степень обжатия, прочностные свойства, пластичность, осадка

INFLUENCE DEGREE OF DEFORMATION FOLLOWED BY PATENTING ON MECHANICAL HOT-ROLLED 40X

Filippov A.A., Pachurin G.V., Kuzmin N.A.

FGBOU VPO Nizhny Novgorod State Technical University R.E. Alekseev,
Nizhny Novgorod, e-mail: PachurinGV@mail.ru

In a number of automotive and other industries widely used high-strength bolted connections, which are one of the most popular types of machinery parts. The paper studies the strength and plastic properties of the original hot-rolled steel for cold forming metal wares and deformed by compression with different degrees (5, 10, 20, 30, 40 and 60%), followed by patenting in a soaking tub in the saltpeter with different temperatures (370, 400, 425, 450 and 550°C). Shown that the initial microstructure of hot-rolled steel is composed of «pearlite + ferrite». These samples pass the test draft up half the height of the original sample. The use of thermal operations patenting at saltpeter bath (400, 425, 450 and 550°C) leads to the appearance of the steel microstructure 40X «sorbitol patenting». In this case, the samples pass the test draft up to 1.3 the height of the original sample. At a temperature as 370°C bath saltpeter, sediment samples are stored only half of the original height of the sample.

Keywords: hot-rolled, saltpeter bath, structure, drawing, reduction ratio, mechanical properties, ductility, sediment

В современных технических конструкциях широко применяются резьбовые детали крепёжного назначения, которые подвергаются закалке с отпуском – упрочнённый стальной крепёж [7]. Значительная часть из них выполняется в виде длинномерных деталей типа болтов, шпилек, стремянок и т.п. Детали получают из сортового проката применением различных технологических операций холодного деформирования [5] – волочения, высадки, накатки резьбы.

Развитие производства упрочнённого крепежа в условиях рыночной экономики, требующего обеспечения конкурентоспособности выпускаемой продукции, наряду с повышением конструкционной прочности и эксплуатационной надёжности, предполагает снижение затрат по всей производственной цепочке, начиная от получения проката [6], и заканчивая изготовлением готовых деталей требуемого качества [9,10]. Особенное значение приобретает этот фак-

тор в производстве крепежа [8], предназначенного для массового потребления, как, например, в автостроении и целом ряде других отраслей промышленности.

Материалы и методы исследований

В плане минимизации стоимости стали наиболее предпочтительной представляется сталь 40X [2]. Данная марка стали стандартизована (ГОСТ 4543), она традиционно имеет наибольшее распространение для упрочняемых крепёжных изделий и зарекомендовала себя легко осваиваемой метизным производством любой степени массовости. При этом соответствующее содержание углерода, и легирование хромом (достаточно экономное) упрощает реализацию предлагаемого технического решения во всех его технологических компонентах [4]. Поэтому для исследования в работе была выбрана широко применяемая в метизном производстве сталь 40X. Её химический состав соответствовал ГОСТ 10702-78. Горячекатаный прокат диаметром 11,0 и 13,0 мм по геометрическим параметрам соответствовал ГОСТ 2590-88 «Прокат стальной горячекатаный круглый» обычной точности прокатки «В».

Металлопрокат из мотка выпрямлялся на станке «Шустер» и нарезались образцы длиной 300 мм, по 8 образцов на указанные ниже размеры исследуемой конструкционной легированной стали 40X.

Отжиг горячекатаного проката стали 40X на микроструктуру – зернистый перлит производился в камерной печи с выдвигаемым подом.

Очистка поверхности термически обработанного проката от окалины производилась в маточном растворе серной кислоты в соотношении: H_2SO_4 – 25%, остальное железный купорос ($Fe_2SO_4 + H_2$). Затем прокат промывали в проточной воде.

Волочение проката производилось на однократном волочильном стане BC/1-750, соответственно со степенями обжатия 5, 10, 20, 30, 40 и 60%. В качестве технологической смазки использовалась мыльная стружка.

После волочения образцы подвергались патентированию. Температура при патентировании и степень обжатия при волочении варьировались в зависимости от задачи исследования. Важным фактором, формирующим окончательную микроструктуру, является гомогенность аустенита. Исходя из этого, температура нагрева перед патентированием принималась 880°C. Образцы проката подвергались нагреву в соляной ванне (78% BaCl + 22% NaCl) в течение 5-ти минут. Затем образцы переносились в селитровую ванну (50% NaNO₃ + 50% KNO₃) и осуществлялась операция патентирования при температурах 370, 400, 425, 450, 500 и 550°C с выдержкой пять минут. Далее охлаждение образцов проводилось на воздухе в течение двух минут, затем они охлаждались в воде. Точность регулирования температуры в ванне при патентировании составляла ± 5°C. Последующую подготовку поверхности (снятие окисного слоя) изотермически обработанного проката производили в маточном растворе серной кислоты (H_2SO_4 – 25%, остальное железный купорос – Fe_2SO_4). Затем прокат промывался в проточной воде.

Прочностные и пластические характеристики горячекатаного проката в исходном состоянии и калиброванного проката после всех видов технологической переработки определялись при испытании на растяжении на разрывной машине типа ЦДМ–100 со шкалой 20 кг. Испытывались образцы длиной 300 мм.

Микроструктура горячекатаного проката в исходном состоянии и калиброванного проката после всех видов технологической переработки исследовалась методом просмотра поверхности специально приготовленных образцов (поперечные микрошлифы) под микроскопом МИМ–8 при увеличении $\times 200 \dots 600$ и на горизонтальном микроскопе «Неофот-21» при

увеличении $\times 100$ и $\times 600$. Металлографические микрошлифы готовились по традиционным для данной марки стали технологиям. Травление микрошлифов производилось в 4% растворе азотной кислоты в этиловом спирте. Твердость измеряли на приборе Роквелл, шкала В С, на параллельных шлифованных лысках. Твердость HRC по переводной шкале переводили в твердость HB.

Результаты исследования и их обсуждение

Микроструктура исходного горячекатаного проката представляет собой «перлит + феррит» (рис. 1).

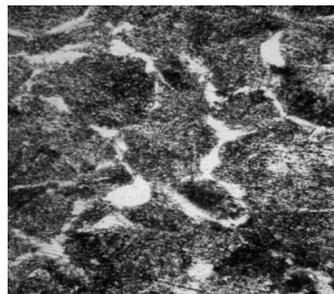


Рис. 1. Структура горячекатаного проката стали марки 40X – перлит + феррит, $\times 500$

Образцы выдержали испытания осадкой до 1/2 высоты первоначального образца, как этого требует ГОСТ 10702-78.

Получены экспериментальные данные о влиянии степени деформации волочением на прочность и пластичность проката с последующим патентированием при разных температурах.

Температура селитровой ванны 370°C

После волочения и последующей выдержки проката в селитровой ванне при температуре 370°C, образцы имеют структуру «троостит». Твердость образца со структурой «троостит» составила HB 306.

Влияние волочения с обжатиями и последующей выдержки в селитровой ванны при температуре 370°C на прочностные и пластические характеристики проката показано на рис. 2 и 3.

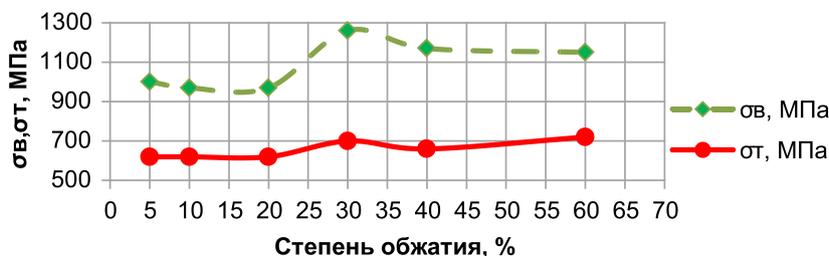


Рис. 2. Зависимость σ_c и σ_t от обжатия волочением и патентирования при 370°C

Результаты, показанные рис. 2, свидетельствуют, что прочностные характеристики стали, патентированной при

температуре 370°C, с увеличением степени обжатия от 5 до 60% меняются немонотонно.

Выявлено, что предел текучести при обжатиях от 5 до 20% постоянен и равен ~615 МПа. При обжатиях от 20 до 30% он увеличивается с 615 до 700 МПа; при обжатиях от 30 до 40% уменьшается с 700 до 670 МПа при обжатиях от 40 до 60% предел текучести вновь увеличивается с 670 до 720 МПа.

Временное сопротивление разрыву при обжатиях от 5 до 20% уменьшается с 1000

до 960 МПа. При обжатиях от 20 до 30% увеличивается с 960 до 1270 МПа; при обжатиях от 30 до 60% снова уменьшается с 1270 МПа до 1150 МПа.

Представленные на рис. 3 данные показывают, что с увеличением обжатия от 5 до 60% и последующем патентировании проката при температуре 370°C, его пластичность изменяется немонотонно.

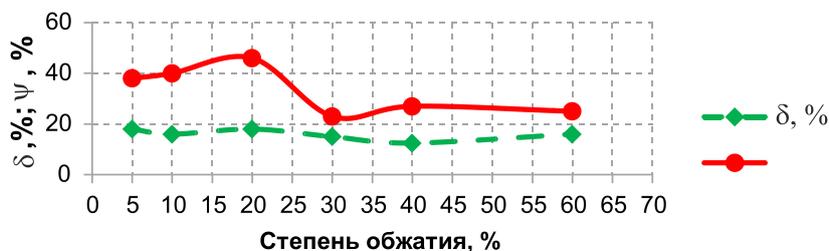


Рис. 3. Зависимость $\delta, \%$ и $\psi, \%$ от обжатия волочением и патентирования при 370°C

Выявлено, что величина относительно удлинения снижается с 18 до 16% при обжатиях от 5 до 10%, но растет с 16 до 18% при обжатиях от 10 до 20%. При обжатиях от 20 до 40% относительное удлинение убывает с 18 до 13%; при обжатиях от 40 до 60% относительное удлинение снова возрастает с 13 до 16%.

Относительное сужение при обжатиях от 5 до 20% возрастает с 37 до 46%. При увеличении степени пластической деформации волочением от 20 до 30% относительное сужение резко снижается с 46 до 24%. При обжатиях от 30 до 40% возрастает с 24 до 28%; при обжатиях с 40 до 60% относительное сужение убывает с 28 до 25%. Образцы выдержали испытания осадкой до 1/2 высоты первоначального образца.

Температура селитровой ванны 400°C

После волочения и последующего патентирования при температуре 400°C образцы имеют структуру «сорбит патенти-

рования». По замеру твердости (НВ 262) установлено, что получена структурная составляющая калиброванного проката стали 40X – «сорбит патентирования». Результаты совпадают с результатами, опубликованными в работах [1,3]. Такая микроструктура хорошо видна при увеличении $\times 600$.

Влияние обжатия при волочении проката на его прочностные и пластические характеристики и последующей выдержки в селитровой ванны при температуре 400°C показано на рис. 4 и 5.

Полученные результаты показывают, что с увеличением обжатия от 5 до 60% при температуре 400°C прочностные характеристики проката изменяются немонотонно. Предел текучести при обжатиях от 5 до 10% уменьшается с 705 до 690 МПа, при обжатиях от 10 до 30% увеличивается с 690 до 800 МПа; при обжатиях от 30 до 40% снова уменьшается с 800 до 750 МПа; при дальнейших обжатиях от 40 до 60% предел текучести увеличивается с 750 МПа до 780 МПа.

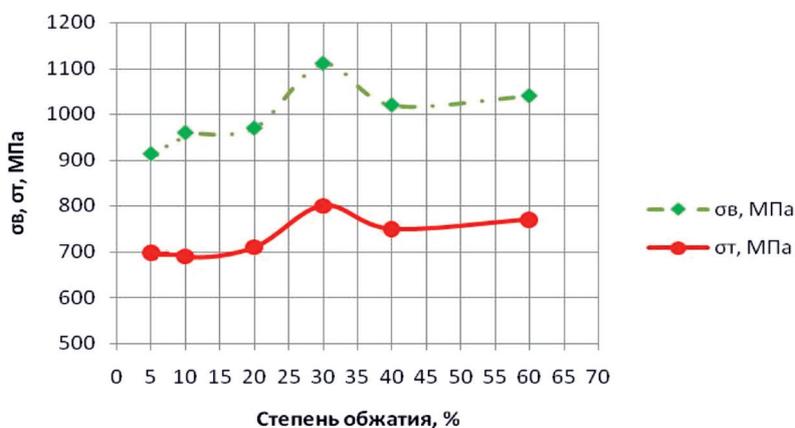


Рис. 4. Зависимость σ_v и σ_m от обжатия волочением и патентирования при 400°C

Временное сопротивление разрыву при обжатиях от 5% до 30% увеличивается с 960 до 1100 МПа. При обжатиях от 30 до

40% σ_b уменьшается с 1100 до 1010 МПа. При дальнейших обжатиях от 40 до 60% вновь увеличивается с 1010 до 1030 МПа.

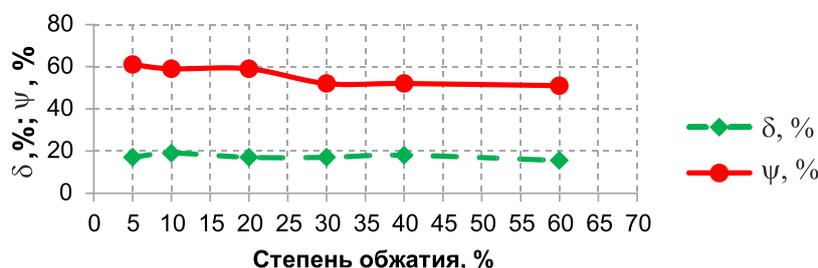


Рис. 5. Зависимость δ , % и ψ , % от обжатия волочением и патентирования при 400 °C

С увеличением обжатия от 5 до 60%, при температуре патентирования 400 °C, пластические характеристики проката изменяются незначительно. Так относительное удлинение практически не изменяется и составляет ~ 17%. Относительное сужение вначале, при обжатиях от 5 до 20%, остается постоянным на уровне ~ 62%, но при обжатиях от 20 до 30% снижается с 62 до 57%,; при 30...60% снова остается постоянным (~ 57%). Образцы выдержали испытания осадкой до 1/3 высоты первоначального образца.

Температура селитровой ванны 425 °C

После волочения проката и последующего патентирования, при температуре 425 °C, образцы имеют структуру «сорбит патентирования». Это установлено по замеру твердости (НВ 255).

Влияние степени обжатия при волочении и последующего патентирования при температуре 425 °C на прочностные и пластические характеристики проката показано на рис. 6 и рис. 7.

Согласно данным рис. 6 установлено, что с увеличением степени обжатия от 5 до 60% и последующего патентирования при температуре 425 °C, меняется прочность проката.

Выявлено, что предел текучести при обжатиях от 5 до 10% уменьшается с 760 до 680 МПа. При обжатия от 10 до 30% он увеличивается с 680 до 800 МПа; при последующих обжатиях от 30 до 40% снова уменьшается с 800 до 700 МПа. Дальнейшее увеличение обжатия от 40 до 60% приводит к увеличению предела текучести с 700 до 720 МПа.

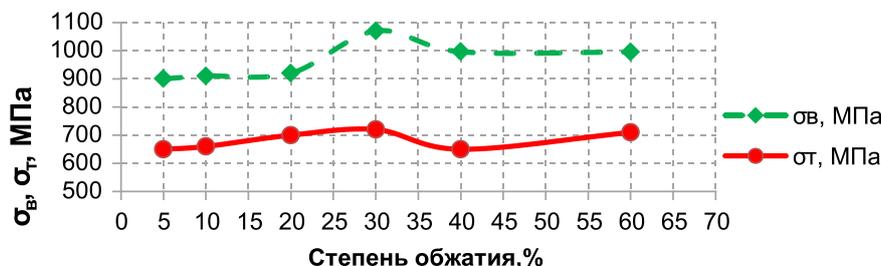


Рис. 6. Зависимость σ_b и σ_t от обжатия волочением и патентирования при 425 °C

Временное сопротивление разрыву при обжатиях от 5 до 20% снижается с 980 до 960 МПа. При обжатии от 20 до 30% оно увеличивается с 960 до 1100 МПа. При дальнейших обжатиях от 30 до 40% оно уменьшается с 1100 до 1000 МПа; при обжатиях от 40 до 60% временное сопротивление разрыву увеличивается с 1000 до 1070 МПа.

Результаты исследования показывают, что с увеличением обжатия от 5 до 60% и патентировании при температуре 425 °C, пластичность проката меняется.

Установлено, что относительное удлинение остается практически постоянным и находится на уровне 17...20%.

Относительное сужение при обжатиях от 5 до 10% снизилось с 61 до 60%; при обжатиях от 10 до 20% осталось постоянным на уровне 60%. При обжатиях от 20 до 30% относительное сужение снизилось с 60 до 52%. При дальнейших обжатиях от 30 до 60% относительное сужение осталось на уровне 52%. Образцы выдержали испытания осадкой до 1/3 высоты первоначального образца.

Температура селитровой ванны 450 °C

После волочения проката стали 40X и при последующем патентировании, при температуре 450 °C, образцы имеют структуру «сорбит патентирования» с твердостью НВ 255.

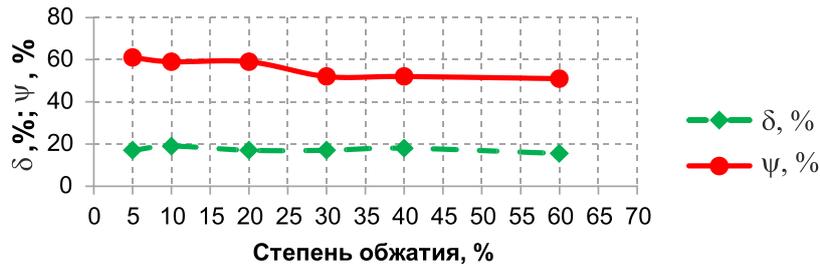


Рис. 7. Зависимость $\delta, \%$ и $\psi, \%$ от обжатия волочением и патентирования при 425 °C

Эффект влияния степени обжатия при волочении и патентирования при температуре 450 °C на прочностные и пластические характеристики проката показан на рис. 8 и 9.

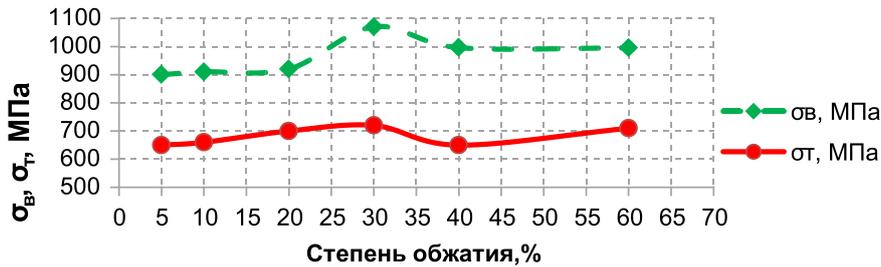


Рис. 8. Зависимость σ_v и σ_m от обжатия волочением и патентирования при 450 °C

Полученные результаты (рис. 8) показывают, что с увеличением обжатия от 5 до 60% и последующего патентирования при температуре 450 °C, увеличиваются прочностные характеристики проката.

Выявлено, что предел текучести при обжатии от 5 до 30% увеличивается с 650 до 715 МПа. При обжатиях от 30 до 40% он

снижается с 715 до 650 МПа; при дальнейших обжатиях от 40 до 60% снова увеличивается с 650 до 715 МПа.

Временное сопротивление разрыву при обжатиях от 5 до 30% увеличивается с 900 до 1080 МПа. При последующих обжатиях от 30 до 60% оно снова уменьшается с 1080 до 1000 МПа.

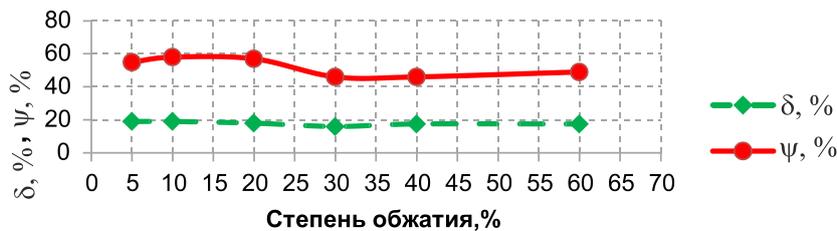


Рис. 9. Зависимость $\delta, \%$ и $\psi, \%$ от обжатия волочением и патентирования при 450 °C

Экспериментальные данные (рис. 9) показывают, что с увеличением обжатия от 5 до 60% и последующего патентирования при 450 °C, пластические характеристики проката меняются.

Установлено, что относительное удлинение остается практически постоянным на уровне ~ 17...20%. Относительное сужение при обжатиях от 5 до 10% увеличивается с 55 до 58%; при обжатиях от 10 до 20% остается постоянным на уровне ~ 58%. Дальнейшее увеличение обжатия от 20 до 30% снижает его с 58 до 47%; при обжатиях от 40 до 60% оно монотонно увели-

чивается с 47 до 50%. Образцы выдержали испытания осадкой до 1/3 высоты первоначального образца.

Температура селитровой ванны 500 °C

После волочения и при последующем патентировании при температуре 500 °C образцы проката имеют структуру «сорбит с участками мартенсита».

Установлено, что мартенсит в структуре «сорбита патентирования» образовался из аустенита при изотермической выдержке при температуре 500 °C и хорошо виден при увеличении x500. Выявлено, что за 5 минут

в селитровой ванне при температуре 500°C не заканчивается полностью превращение аустенита и при последующем охлаждении на воздухе оставшейся аустенит переходит в мартенсит. Микроструктура «сорбит с включениями мартенсита» является

структурой неоднородной, т.к. твердость (сорбита) колеблется от 260 до 311 НВ.

Влияние обжатия и патентирования при температуре 500°C на прочностные и пластические характеристики проката показано на рис. 10 и 11.

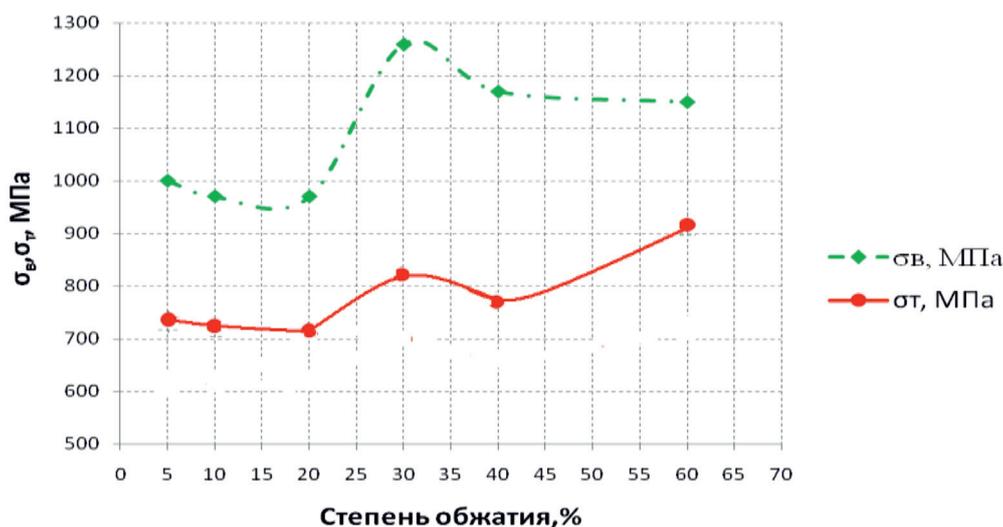


Рис. 10. Зависимость σ_v и σ_t от обжатия и патентирования при 500°C

Экспериментальные данные, представленные на рис. 10, показывают, что с увеличением обжатия от 5 до 60% и последующем патентировании при температуре 500°C, прочность проката увеличивается.

Выявлено, что предел текучести при обжатиях от 5 до 20% снижается с 720 до 710 МПа; при обжатиях от 20 до 30% увеличивается с 710 до 820 МПа. Обжатия от 30 до 40% приводит к снижению предела текучести с 820 до 780 МПа. Дальнейший

рост предела текучести наблюдается при обжатиях от 40 до 60% и возрастает с 780 до 910 МПа.

Временное сопротивление разрыву при обжатиях от 5 до 20% снижается с 1000 до 980 МПа. При обжатиях от 20 до 30% значительно возрастает от 980 до 1250 МПа. При дальнейшем увеличении обжатия от 30 до 60% происходит монотонное снижение временного сопротивления разрыву с 1250 до 1150 МПа.

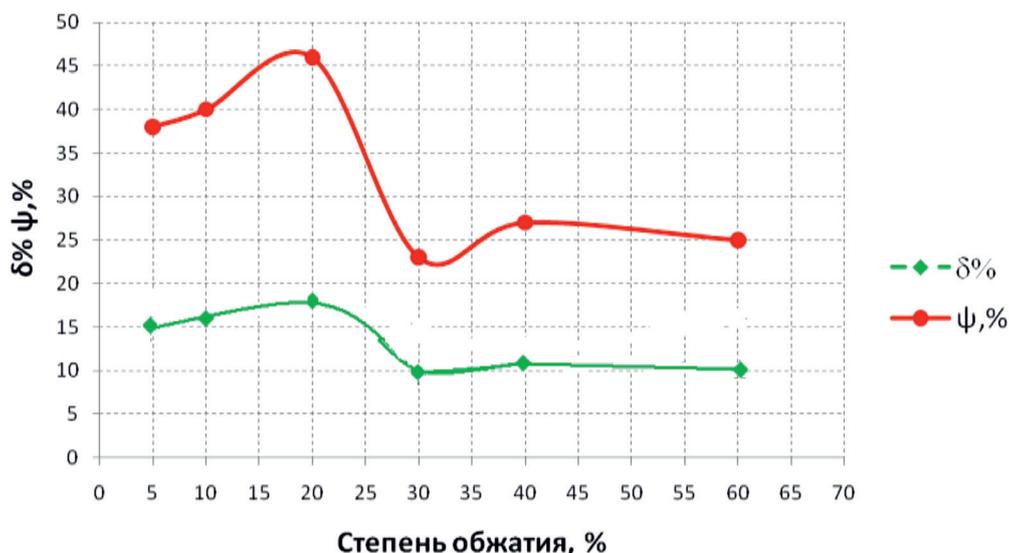


Рис. 11. Зависимость δ , % и ψ , % от обжатия и патентирования при 500°C

Полученные результаты показывают, что с увеличением обжатия от 5 до 60% и последующем патентировании при температуре 500°C, пластические характеристики проката изменяются немонотонно.

Установлено, что относительное удлинение при обжатиях от 5 до 20% увеличивается с 15 до 17%, а при обжатиях с 20 до 30% резко снижается с 17 до 10%. При дальнейших обжатиях от 30 до 60% оно остается постоянным на уровне 10%.

Относительное сужение при обжатиях от 5 до 20% монотонно увеличивается с 37 до 46%. При обжатиях от 20 до 30% резко снижается с 46 до 23%. При увеличении обжатия от 30 до 40% относительное сужение увеличивается с 23 до 27%; при обжатиях от 40 до 60% величина относительного сужения снижается с 27 до 25%.

Образцы выдержали испытания осадкой до 1/2 высоты первоначального образца, но не выдержали испытания до 1/3 высоты первоначального образца.

Температура селитровой ванны 550°C

После волочения и при последующем патентировании при температуре 550°C, образцы проката имели структуру «сорбит патентирования» с твердостью НВ 235.

Эффект влияния обжатия при волочении и последующего патентирования при температуре 550°C на прочностные и пластические характеристики проката представлены на рис. 12 и рис. 13.

Согласно данным, представленным на рис. 3.22, увеличение обжатия от 5 до 60% и температура патентирования 550°C, существенно меняют прочностные характеристики проката.

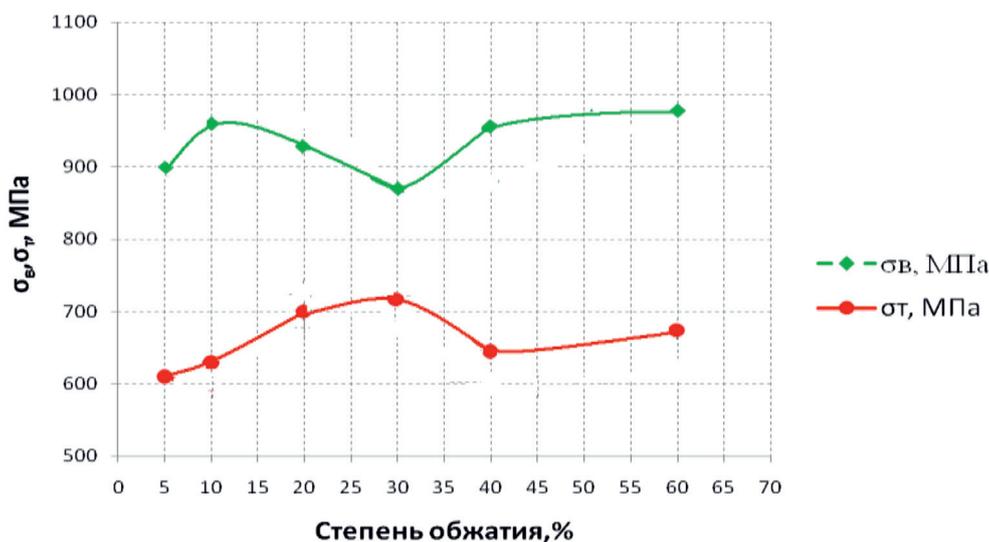


Рис. 12. Зависимость σ_v и σ_t от обжатия и патентирования при 550°C

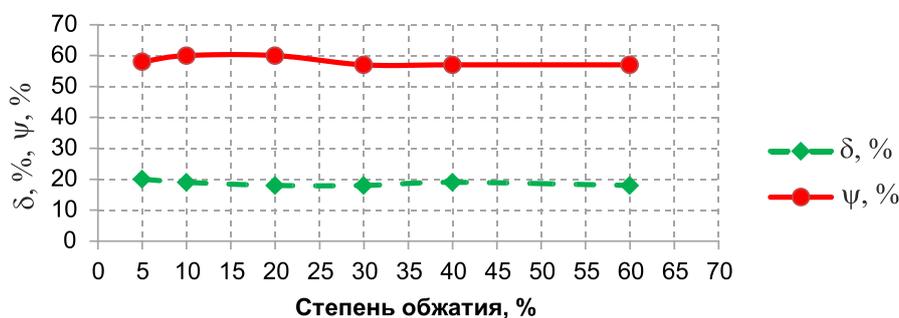


Рис. 13. Зависимость $\delta, \%$ и $\psi, \%$ от обжатия и патентирования при 550°C

Установлено, что предел текучести в диапазоне обжатий от 5 до 30% увеличивается с 600 до 710 МПа. При обжатиях от 30 до 40% его величина снижается с 710 до 660 МПа. При дальнейшем увеличении обжатия

от 40 до 60% предел текучести увеличивается с 660 до 680 МПа.

Временное сопротивление разрыву при обжатиях от 5 до 10% увеличивается с 900 до 960 МПа. При обжатиях от 10 до 30%

оно снижается с 960 до 880 МПа. При обжатиях от 30 до 60% временное сопротивление разрыву снова монотонно увеличивается с 880 до 980 МПа.

Результаты данных (рис. 13) показывают, что с увеличением обжатия от 5 до 60% и последующего патентирования при температуре 550°C, пластические характеристики проката практически не изменяются.

Установлено, что относительное удлинение во всем диапазоне обжатия остается постоянным на уровне ~ 18...20%.

Относительное сужение при обжатиях от 5 до 20% увеличивается с 58 до 60%. При обжатиях от 20 до 30% снижается с 60 до 57%. При дальнейших увеличении обжатия от 30 до 60% относительное сужение остается практически постоянным на уровне ~ 57%.

Образцы выдержали испытания осадкой до 1/3 высоты первоначального образца.

Выводы

1. Получены зависимости прочностных и пластических характеристик подвергнутой волочению со степенями обжатия 5, 10, 20, 30, 40 и 60% горячекатаной стали 40X с последующим патентированием при температурах селитровой ванны 370, 400, 425, 450 и 550°C.

2. Микроструктура исходного горячекатаного проката представляет собой «перлит + феррит». Образцы выдерживают испытания осадкой до 1/2 высоты первоначального образца

3. Применение термической операции патентирования при температуре селитровой ванны (400, 425, 450 и 550°C) приводит к появлению в стали 40X микроструктуры «сорбит патентирования». При этом образ-

цы выдержали испытания осадкой до 1/3 высоты первоначального образца, в то время как при температуре селитровой ванны 370°C, лишь 1/2 от первоначальной высоты образца.

Список литературы

1. Иванов В.Н. Словарь-справочник по литейному производству. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.
2. Пачурин Г.В., Филиппов А.А. Экономичная технология подготовки стали 40X к холодной высадке крепежных изделий // Вестник машиностроения, 2008. – № 7. – С. 53–56.
3. Пачурин Г.В., Филиппов А.А. Выбор рациональных значений степени обжатия горячекатаной стали 40X перед холодной высадкой метизов // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2008. – № 7. – С. 23–25.
4. Пачурин Г.В., Филиппов А.А., Кузьмин Н.А. Влияние химического состава и структуры стали на качество проката для изготовления болтов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 8 (Часть 2). – С. 87–92.
5. Пачурин Г.В., Филиппов А.А. Эффект пластической деформации при волочении и термической обработки на структуру и свойства стального проката // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 8 (Часть 2). – С. 93–98.
6. Пачурин Г.В., Филиппов А.А., Кузьмин Н.А. Анализ качества проката для холодной высадки крепежных изделий // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 8 (Часть 2). – С. 111–115.
7. Филиппов А.А., Пачурин Г.В., Кузьмин Н.А. Упрочняющая обработка проката для крепежа с целью снижения его стоимости // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 8 (Часть 2). – С. 107–110.
8. Филиппов А.А., Пачурин Г.В. Ресурсосберегающая подготовка стального проката к холодной высадке крепежных изделий // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 8. (Ч. 4). – С. 23–29.
9. Филиппов А.А., Пачурин Г.В. Основные направления развития производства высокопрочного крепежа // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 8. (Ч. 4). – С. 30–36.
10. Pachurin G.V., Filippov A.A. Economical preparation of 40X steel for cold upsetting of bolts // Russian Engineering Research. – 2008. – Т. 28, № 7. – С. 670–673.