

FRI-1.317-1-MEMBT-04

INFLUENCE OF DRAWING DIE GEOMETRY ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF LOW-CARBON STEEL WIRES

Eng. Ivan Iliev

PhD student at the Department of Materials Science and Technology
University of Ruse
Tel.:
E-mail: iiiivanov@uni-ruse.bg

Assoc. Prof. Danail Gospodinov, PhD

Department of Materials Science and Technology
University of Ruse
Tel.: 082 888 210
email: dgospodinov@uni-ruse.bg

Prof. Rossen Radev, PhD

Department of Materials Science and Technology
University of Ruse
Tel.: 082 888 778
email: dgospodinov@uni-ruse.bg

Abstract: *In this study, the influence of the die working angle and the degree of cross-sectional reduction during the cold drawing of low-carbon steel wires was analyzed with respect to their mechanical performance, while also considering the economic efficiency of the process. Experimental trials were carried out using two wire diameters—2.80 mm and 4.10 mm—at die working cone angles of 12° and 16°, and reduction ratios of 17%, 23%, and 27%. The obtained results demonstrate that increasing both the reduction ratio and the working cone angle leads to higher tensile and yield strengths, accompanied by a decrease in ductility. Based on the analysis, the optimal die geometry parameters were identified, ensuring the most favorable mechanical properties and cost-effectiveness for wire production intended for nail manufacturing.*

Keywords: *wire; die; drawing; steel*

ВЪВЕДЕНИЕ

Телоизтеглянето е една от най-старите и добре познати техники за обработване на метални материали (Avitzur, D., 1983). Основният инструмент използван при този процес е изтеглячната дюза, чиято геометрия оказва пряко влияние върху механичните свойства на теловете, но така също и върху производствената себестойност (Trent, E.M., 2000; Horvath G., 2020). Правилният избор на работен ъгъл и степента на намаление има важно значение за осигуряване на добри механични показатели за процеса на производство, като висока якост и същевременно запазване на достатъчна пластичност на материала (Lee, J. M., 2021; Causton, R. J., 2010).

Неправилно проектираната геометрия може да доведе до различни проблеми:

- увеличаване на триенето и намаляване на мазането, водещо до бързо износване на дюзата и поява на повърхностни дефекти;
- неравномерно разпределение на напреженията в телта, водещо до остатъчни напрежения и повърхностни дефекти;
- намаляване на пластичността на телта и от там влошаване на механичните свойства (Tönshoff, H. K., Denkena, B., Brandt, D., & Krödel, A., 2000)

Основният проблем при изтегляне на телове е износването на дюзите, което се явява основен критерий за икономическата ефективност на процеса (Kumar, K. S., 2021). Поради това увеличаването на дълготрайността им все още е актуален въпрос от съществено значение. Това налага изследване и анализ на факторите, оказващи влияние върху износването и търсене на възможности за подобряване на условията за провеждане на процеса (Makarov, S. D., 2022).

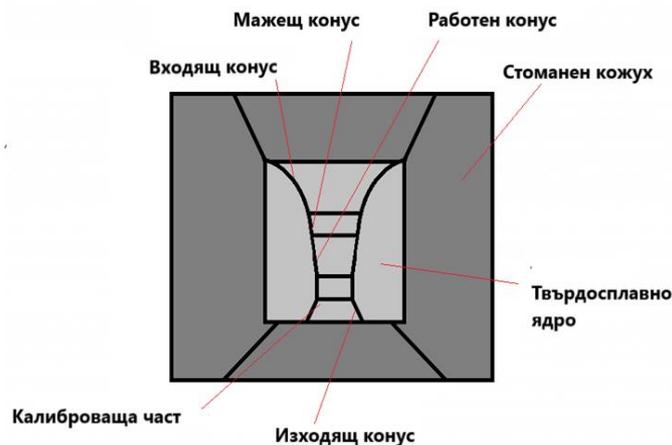
Като основни и пряко влияещи на износването на дюзите фактори, могат да бъдат посочени:

- геометрия на дюзата;
- условия на изтегляне – скорост, смазване, охлаждане и др.;
- материал на дюзата и наличие на износоустойчиви покрития;
- материал на изтегляния тел;
- тип на машината и др.

Степента на влияние на всеки един от тези фактори е трудно да бъде определена, но дългогодишното им изследване е доказало, че геометрията на дюзата (при един и същи материал за нейното изработване) оказва най-силно влияние върху износоустойчивостта (Suliga, A., 2017).

Основната геометрията на дюзата се състои от пет зони (фиг. 1) (Вичев, Л., Ламбрев, Д., & Дончев, Т., 1977):

- входящ конус – улеснява навлизането на телта;
- мажещ конус – осигурява увеличаването на лубрикант;
- работен конус – извършва се деформирането на метала;
- калибровачка част – там се контролира финалния размер;
- изходящ конус – улеснява излизането на телта и намаля риска за счупване на дюзата.



Фиг.1 Общ вид на дюза за изтегляне на телове

За постигане на добри резултати при изтеглянето, освен избор на подходяща геометрия, е необходимо правилно определяне на технологичните режими: степени на намаление, смазващи средства, охлаждане и скорости на изтегляне (Suliga, M., 2024).

Под степен на намаление се разбира относителното свиване на напречното сечение на телта при преминаване през една дюза. Максималното единично свиване може да достигне до 40%, в зависимост от пластичността на материала и наличието на предварителна обработка (Wang, Z. M., 2019).

В днешно време има редица научни публикации, разглеждащи влиянието на различни условия по време на процеса на изтегляне върху подобряването на производителността, качеството и механичните свойства на стоманените телове (Perez, R., 2023). В много от тях е установено нарастване на якостта на опън при нарастване на ъгъла на работния конус и

дължината на калибровачната зона, което се обяснява основно с промени в структурата, протичащи по време на изтеглянето (Suliga, M., 2018; Dziwulski, P., 2022; Geiger, M., Engel, U., & Kopp, R., 1998).

Целта на настоящата работа е да се установи влиянието на геометрията на изтеглячната дюза върху механичните свойства на нисковъглеродни телове използвани при производството на гвоздеи. При анализирането на получените резултати е отчетена и икономическата ефективност на процеса, на база на което, в края на работата са препоръчани подходящи режими.

МЕТОДИКА

Материал на валцдрата

За целите на изследването, като изходна суровина за получаване на желаните диаметри, е използван нисковъглероден стоманен валцдрат с диаметри 6.5 mm за получаване на тел за гвоздеи с диаметър 4.1 mm и валцдрат с диаметър 5.5 mm за получаване на диаметър 2.80 mm. Валцдрата за изтегляне отговаря на изискванията на стандарт БДС EN 10025-2:2019. Този материал е предпочитан за изработка на гвоздеи, поради ниското съдържание на въглерод и висока пластичност, което го прави подходящ за студено изтегляне, както и последващо пластично деформиране – насичане на гвоздеи. Наличието на минимални количества Mn, Si и Cu подпомага повишаването на якостта след уякчаване, без значително да намалява пластичността му (Totten, G. E., 2019).

Химични и механични показатели на суровината от която са изтеглени теловете, по сертификата от производителя са следните:

- за валцдрат с диаметър 6.5 mm

Табл.1 Химичен състав и механични свойства на валцдрат с диаметър 6.5 mm

| Горещо валцована стомана Ø6.50 mm БДС EN 10025-2:2019 с химичен състав в % | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| C | Mn | Si | S | P | Cr | Ni | Cu | N |
| 0.056 | 0.353 | 0.046 | 0.011 | 0.018 | 0.029 | 0.03 | 0.032 | 0.007 |
| Якост на опън, N/mm ² | | | | 390 | - | - | - | - |
| Граница на провлачване, N/mm ² | | | | 270 | - | - | - | - |
| Относително удължение, % | | | | 25.5 | - | - | - | - |

- за валцдрат с диаметър 5.5 mm

Табл.2 Химичен състав и механични свойства на валцдрат с диаметър 5.5 mm

| Горещо валцована стомана Ø5.50 mm БДС EN 10025-2:2019 с химичен състав в % | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| C | Mn | Si | S | P | Cr | Ni | Cu | N |
| 0.077 | 0.328 | 0.029 | 0.011 | 0.012 | 0.043 | 0.031 | 0.042 | 0.005 |
| Якост на опън, N/mm ² | | | | 385 | - | - | - | - |
| Граница на провлачване, N/mm ² | | | | 255 | - | - | - | - |
| Относително удължение, % | | | | 25.5 | - | - | - | - |

Както се вижда от табл.1 и 2, по химичен състав и механични свойства, стоманата отговаря на S235, съгласно изискванията на БДС EN 10025-2:2019.

Параметри на процеса

Студено изтегляне на тел се произвежда, чрез преминаване на изходния материал (горещо валцована стомана) през дюзи с различни работни ъгли и брой степени на намаление. Най-често използваните работни ъгли са от 12° до 16° , а единичните свивания/намаления са от 17% до 25 % (Вичев, Л., Ламбрев, Д., & Дончев, Т., 1977). И двата фактора оказват значително влияние върху размера и механичните свойства на крайния продукт. в зависимост от размера който искаме да получим, които оказват влияние на крайните параметри на изделието.

Провеждането на експерименталната работа е извършено посредством използване на карбидни твърдосплавни дюзи със следните параметри:

- Работен ъгъл α : 12° , 16°
- Степен на намаление: ~17%, ~23%, ~27%

Ще бъдат изследвани основните механични показатели оказващи влияние на процеса на производство на гвоздеи, а именно:

- Якост на опън (R_m)
- Граница на провлачване ($R_{0.2}$)
- Относително удължение ($A\%$)

Общата редукция (процент намаление) и нейното разпределение между последователните степени е ключов фактор. Голямата обща редукция, дава по-голямо уякчаване (по-висока σ_m), но намалява пластичността. Изборът на брой степени е тясно свързан със скоростта, износването на дюзите и продуктивността (Verma, S., & Rao, P. S., n.d.):

- за при диаметър на тела 2.80 mm:
 - за 17% - 7 степени на намаление;
 - за 23% - 5 степени на намаление;
 - за 27% - 4 степени на намаление.
- за при диаметър на тела 4.10 mm:
 - за 17% - 5 степени на намаление;
 - за 23% - 4 степени на намаление;
 - за 27% - 3 степени на намаление.

Изисквания към механичните свойства на крайния продукт

Строителните гвоздеи се произвеждат основно от нисковъглеродна стомана обикновено SAE 1006, SAE 1008 или SAE 1010, която осигурява добра пластичност и достатъчна якост при ударно натоварване, като при самия процес на студено изтегляне тя получава допълнително механично уякчаване. Според стандартите, основните показатели на които трябва да отговарят те са:

- Якост на опън $R_m > 600$ MPa (в зависимост от класа и приложението) (ASTM F1667:2003, EN 14592:2022);
- Граница на провлачване $R_{p0.2} \geq 500$ MPa, (EN 10218-1:2012)
- Относително удължение $A\% \geq 15\%$, (EN 10025-2:2019).

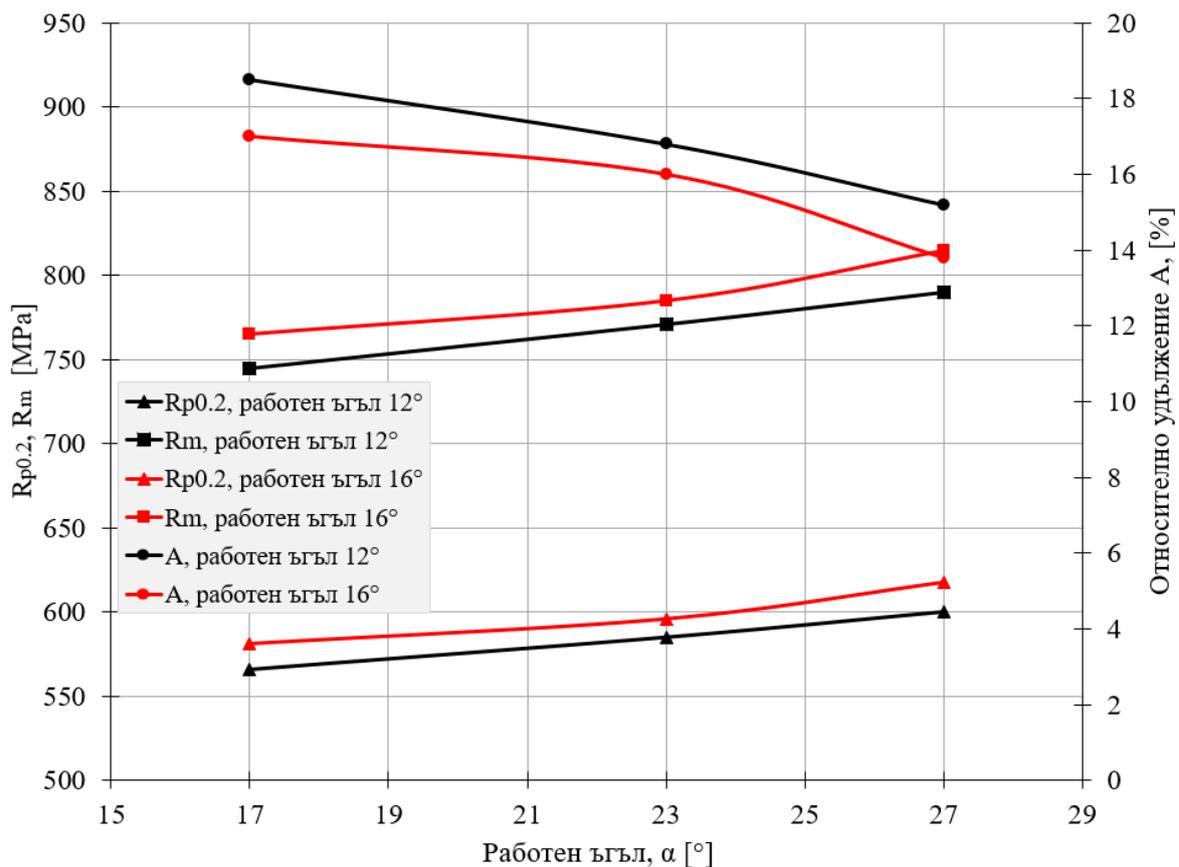
Резултати и анализ

В таблици 3 и 4 и на фиг. 1 и 2 са представени експериментално получените резултати за двата изследвани диаметъра на тела (2.8 mm и 4.1 mm).

Табл. 3 Механични показатели при диаметър 2.80 mm

| Ъгъл (°) | Намаление (%) | R_m (MPa) | $R_{0.2}$ (MPa) | A (%) |
|----------|---------------|-------------|-----------------|-------|
| 12 | 17 | 745 | 566 | 18.5 |
| 12 | 23 | 771 | 585 | 16.8 |
| 12 | 27 | 790 | 600 | 15.2 |
| 16 | 17 | 765 | 581 | 17.0 |
| 16 | 23 | 785 | 596 | 16.0 |
| 16 | 27 | 815 | 618 | 13.8 |

На фиг.2 се вижда ясно изразеното влияние на двата фактора върху механичните свойства на крайния продукт. По-плавната редукция на диаметъра на валцдрата, реализирана с посредством по-малък ъгъл на работната част на дюзата и увеличен брой на преходите води до по-слабо нарастване на якостните свойства и запазване на по-висока пластичност в сравнение с използването на по-голям работен ъгъл и намален брой на редуциите на диаметъра. При това степента на влияние на двата фактора е различна. Използването на дюзи с по-голям конус на работната част водят до нарастване на якостните характеристики с около 3%, без значение от броя на преходите. По отношение на пластичността, намаляването е средно с 7.4%, като се разсейва в границите между 9.2 и 4.8%.



Фиг.2 Влияние на работния ъгъл и степента на намаление върху якостните и деформационни характеристики за диаметър на тела 2.8 mm

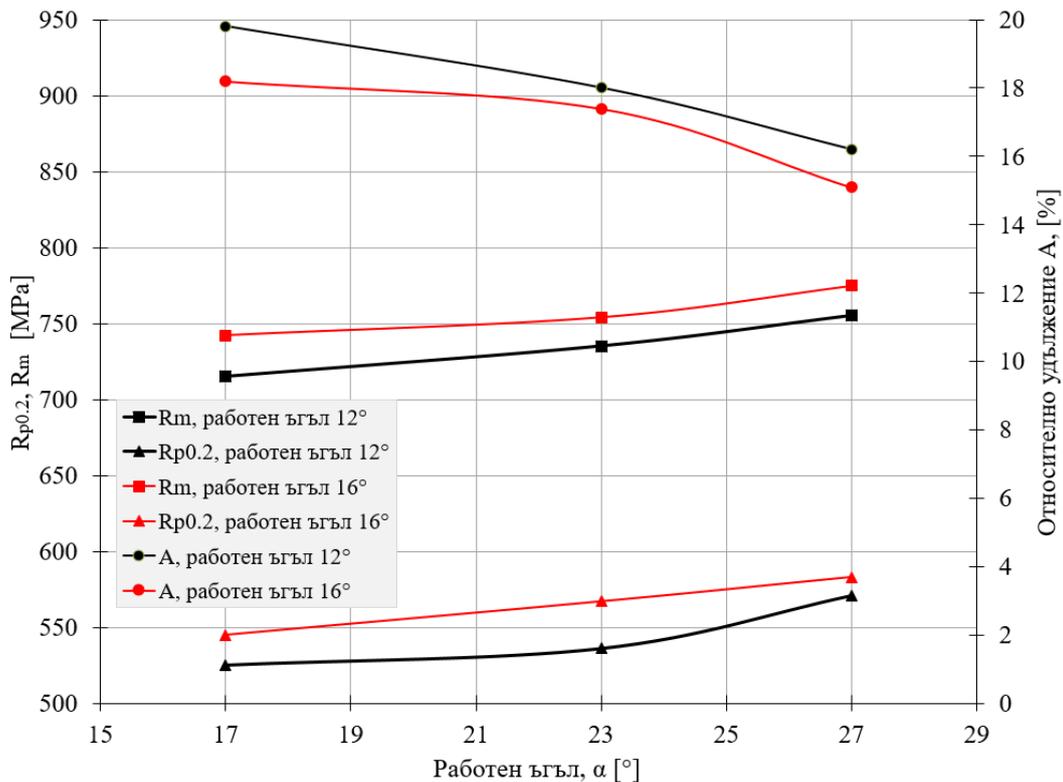
Както се вижда от същата фигура влиянието на втория изследван фактор е по-значимо. Така намаляването на броя на преходите от 7 на 4 води до нарастване на якостните характеристики

средно с 5.8%, като стойностите се разсейват от 5.7 до 6.1%. По отношение на пластичността може да се отбележи намаляване средно с 18.3 %

Табл. 4 Механични показатели при диаметър 4.10 mm

| Ъгъл (°) | Намаление (%) | R _m (MPa) | R _{0.2} (MPa) | A (%) |
|----------|---------------|----------------------|------------------------|-------|
| 12 | 17 | 715 | 525 | 19.8 |
| 12 | 23 | 735 | 536 | 18.0 |
| 12 | 27 | 755 | 571 | 16.2 |
| 16 | 17 | 742 | 545 | 18.2 |
| 16 | 23 | 754 | 567 | 17.4 |
| 16 | 27 | 775 | 583 | 15.1 |

От фиг. 3, показваща изменението на механичните характеристики при валцдрат с начален диаметър 4.1 mm се вижда, че характера на изменение на характеристиките във функция от влиянието на изследваните фактори е подобно.



Фиг.3 Влияние на работния ъгъл и степента на намаление върху якостните и деформационни характеристики за диаметър на тела 4.1 mm

В този случай използването на дюзи с по-голям конус на работната част води до нарастване на якостните характеристики средно с 3.4%, при разсейване в границите 2.4 до 5.5 и намаляване на деформационните характеристики средно с 5.6% при разсейване от 3.3 до 8%.

И тук влиянието на броя на преходите е по-значим фактор, като намаляването им от 5 на 3 води до нарастване на якостните характеристики средно с 6% (разсейване в границите 4.3 до 8%) и намаляване на деформационните с 17.5%.

От гледна точка на икономическата ефективност трябва да бъде отчетен и броят степени на намаление, тъй като те оказват влияние върху енергийният разход, разхода на лубрикант и др., т.е. при по-голям брой намаления се натрупват повече разходи. Предвид това може да се отбележи, че:

1. редукция от 17%, реализирана посредством 7 степени на изтегляне до достигане на \varnothing 2.80 mm, е свързана с по-високи разходи на време и енергия, при запазване на добра пластичност.

2. редукция 23%, реализирана посредством 5 степени на намаление, до достигане на размер \varnothing 2.80 mm, дава най-добри резултати по отношение на якост, пластичност и себестойност.

3. редукция от 27%, реализирана посредством 4 степени до достигане на размер \varnothing 2.80 mm, е съпътствана от най-малки разходи за производство, но крайният продукт има завишени якостни показатели и занижена пластичност. Това съчетание от механични показатели може да се ползва само след допълнително съгласуване с крайният потребител.

Както вече се отбеляза аналогична е тенденцията и при \varnothing 4.10 mm. Най-добър резултат относно механични свойства и цена се постига при ъгъл 16° и 23% намаление (4 степени), осигуряващи висока якост ($\sigma_m \approx 550$ MPa), приемлива пластичност ($A\% \approx 17.4$) и намалени разходи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Геометрията на дюзата и броя на преходите оказва съществено влияние върху механичните и икономическите показатели на процеса. Вторият фактор е с два пъти по-голяма степен на влияние по отношение на характеристиките на механичните свойства, като той е определящ и за себестойността на крайния продукт.

По-големият работен ъгъл (16°) и умерена степен на намаление (23%) осигуряват оптимален компромис между якост, пластичност и себестойност и при двата изследвани диаметъра.

Прилагането на такива режими би повишило ефективността на производството на гвоздеи чрез намаляване на броя степени на изтегляне и разхода на енергия.

REFERENCES

- Avitzur, D. (1983). Metal forming: Processes and analysis. McGraw-Hill.
- Trent, E. M. (2000). Metal cutting and tool wear. Butterworth-Heinemann.
- Horvath, G. (2020). Effect of die geometry on the drawing stress of low-carbon steel wires. *Journal of Materials Processing Technology*, 284, 116–125.
- Lee, J. M. (2021). Optimization of drawing angle and reduction ratio in wire drawing. *Procedia Manufacturing*, 50, 745–752.
- Causton, R. J. (2010). Wire technology: Process engineering and metallurgy. Elsevier.
- Tönshoff, H. K., Denkena, B., Brandt, D., & Krödel, A. (2000). Influence of lubrication on wire drawing tool wear. *CIRP Annals*, 49(1), 213–216.
- Kumar, K. S. (2021). Tool wear behavior of tungsten carbide dies in multi-pass wire drawing. *Wear*, 486–487, 203045.
- Makarov, S. D. (2022). Impact of lubrication and friction on die life in wire drawing. *Metals*, 12(8), 1294.
- ASTM International. (2022). ASTM A510/A510M – Standard specification for wire rods and coarse round wire, carbon steel. ASTM International.

- Suliga, A. (2017). Assessment of die geometry and friction on mechanical properties of steel wires. *Archives of Metallurgy and Materials*, 62, 621–627.
- European Committee for Standardization (CEN). (2012). EN 10218-1:2012 – Steel wire and wire products – General. CEN.
- Wang, Y., Zhang, H., & Liu, J. (2020). Finite element analysis of wire drawing die geometry and stress distribution. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 906, 012033.
- International Organization for Standardization (ISO). (2020). ISO 16859-1:2020 – Metallic materials – Wire drawing – Determination of drawing conditions. ISO.
- Wang, Z. M. (2019). Effect of reduction ratio on tensile properties in multi-pass drawing. *Materials & Design*, 178, 107870.
- International Organization for Standardization (ISO). (2019). EN ISO 6892-1:2019 – Metallic materials – Tensile testing – Method of test at room temperature. ISO.
- Perez, R. (2023). Optimization of process parameters for low-carbon wire drawing. *Metals and Materials International*, 29, 654–662.
- Suliga, M. (2018). Analysis of the influence of die geometry on steel wire drawing process. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27, 3409–3416.
- Dziwulski, P. (2022). Experimental study of stress and strain distribution during wire drawing. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 22, 1785–1798.
- Geiger, M., Engel, U., & Kopp, R. (1998). Tribological and structural aspects of metal drawing. *CIRP Annals*, 47(1), 171–174.
- Totten, G. E. (2019). *Steel heat treatment handbook*. CRC Press.
- Verma, S., & Rao, P. S. (n.d.). Design and analysis of process parameters on multistage wire drawing process. [Unpublished manuscript].
- Вичев, Л., Ламбрев, Д., & Дончев, Т. (1977). Производство на тел, телени изделия и въжета. [Учебник].
- ASTM International. (n.d.). ASTM F1667 – Standard specification for driven fasteners: Nails, spikes, and staples. ASTM International.
- European Committee for Standardization (CEN). (n.d.). EN 14592 – Timber structures – Dowel-type fasteners – Requirements. CEN.
- European Committee for Standardization (CEN). (2019). EN 10025-2:2019 – Hot rolled products of structural steels – Technical delivery conditions. CEN.