

Vplivi na mehanske lastnosti sive litine

Contribution to the mechanical properties of grey cast iron

1 Uvod

Siva litina z lamelnim grafitom ali siva litina (GB) ali Gusseisen mit Lamellengraphit GJL, kratko Grauguss (D), skladno s standardom DIN EN 1561 (1997-08), še naprej zavzema prvo mesto na področju proizvodnje ulitkov iz materialov Fe-C-Si, kljub zmanjšanju obsega proizvodnje (Sl. 1) [1].

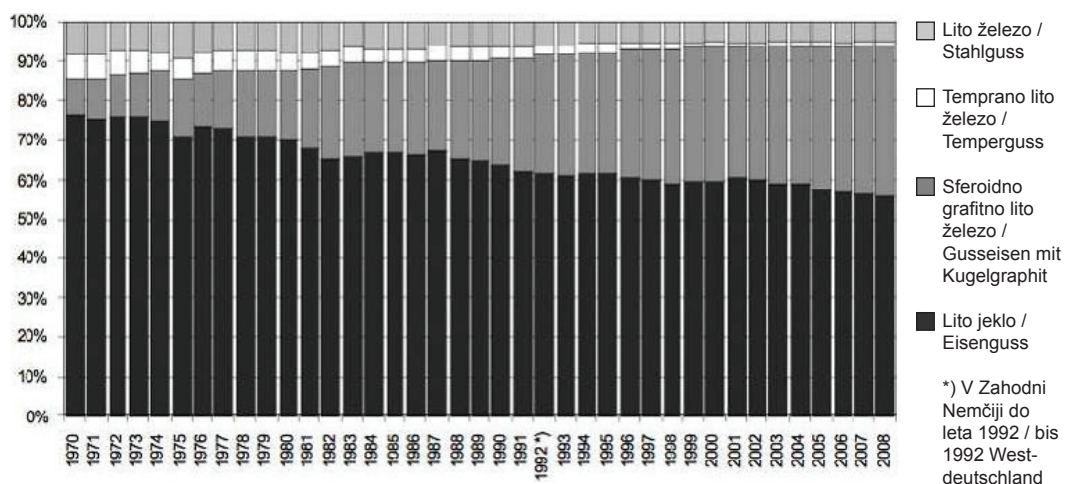
V Preglednici 1 je prikazano, da je bilo v Nemčiji v letu 2014 proizvedenih

2,3 milijona ton sive litine (GJL), kar ustreza 57 % celotne proizvodnje materialov Fe-C-Si v skupni vrednosti 4,1 milijona ton. Leta 2014 je bilo na svetu vsega

1 Introduction

Flake graphite cast iron or lamellar graphite cast iron or grey cast iron (GB) or gray cast iron (US) or Gusseisen mit Lamellengraphit GJL or briefly Grauguss (D) according to DIN EN 1561 (1997-08) maintains its leading position as Nr. 1 within the group of cast Fe-C-Si-materials in spite of decreasing percentage of production (fig. 1) [1].

Following table 1 Germany in 2014 produced 2,3 Mio t GJL = 57 % of the total Fe-C-Si-sum 4,1 Mio t. In 2014 the whole world produced 47,5 Mio t = 56 % of the total Fe-C-Si-sum 84,4 Mio t (Modern Casting



Slika 1: Proizvodnja ulitkov iz materialov Fe-C-Si v % v Nemčiji med 1970–2008

Figure 1: Production of cast Fe-C-Si-materials in % in Germany 1970-2008

Vir / Source: Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie (BDG)

skupaj proizvedenih 47,5 milijonov ton sive litine, kar znaša 56 % celotne proizvodnje materialov Fe-C-Si v skupni vrednosti 84.4 milijona ton (Modern Casting, december 2015). Drugo mesto po količini proizvodnje neverjetno zavzema nodularno (grafitno) lito železo GJS s 37 % (v svetu 30 %), sledi mu lito jeklo s 5 % (v svetu 13 %) in temprano lito železo z 1 % (tako v Nemčiji kot v svetu) [2].

December 2015). The next amazing position reached nodular (spheroidal) graphite cast iron GJS with 37 % (world 30 %), followed by cast steel 5 % (world 13 %) and malleable cast iron 1 % (D and world) [2].

2 Technical Discussion

One main reason for the leading position of grey cast iron in spite of decreasing

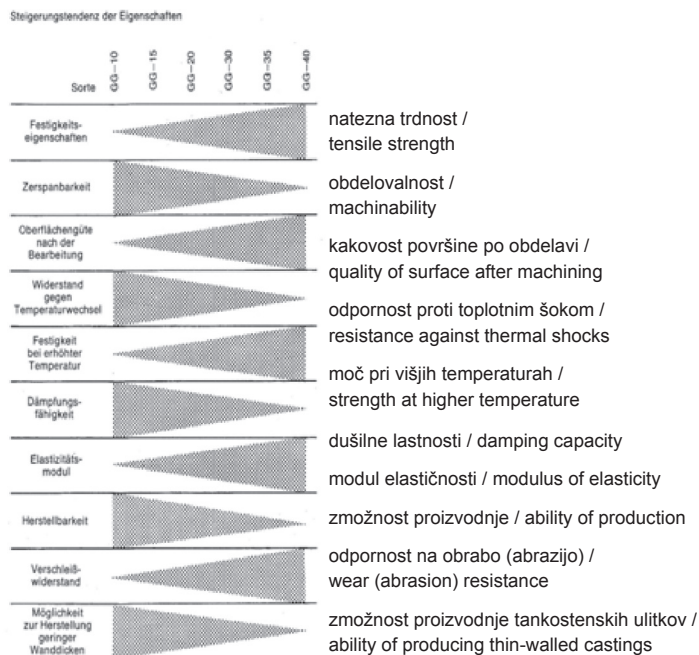
Preglednica 1: Proizvodnja litin iz materialov Fe-C-Si- v letu 2014 [2]

Table 1: Production of cast Fe-C-Si-materials in 2014 [2]

	Nemčija / Germany		Svet / World	
	v tonah / in tons	%	v tonah / in tons	%
GJL	2.355.957	57	47.461.966	56
GJS	1.520.855	37	25.032.847	30
GJMB + GJMW	30.486	1	900.818	1
GS	206.894	5	11.049.705	13
skupaj / total	4.114.192	100	84.445.336	100

Slika 2: Nekatere mehanske, fizikalne in tehnološke lastnosti sive litine s povečano natezno trdnostjo [3]

Figure 3: Some mechanical, physical and technological properties of grey cast iron with increasing tensile strength [3]



2 Tehnična razprava

Eden izmed glavnih vzrokov za vodilni položaj sive litine kljub zmanjšanju obsega proizvodnje (leta 1970 v Nemčiji 77 %, leta 2014 pa 57 %) predstavlja izvrstna kombinacija njenih mehanskih, fizikalnih in tehnoloških lastnosti.

Nekaj tehnoloških lastnosti je prikazanih v Sl. 2 [3]. Drug razlog za tako obširno uporabo pa je gospodarna proizvodnja.

Prof. W. Patterson, moj učitelj v Aachnu, je dejal: »Siva litina (Grauguss) je tako popoln material, da bi ga bilo treba nemudoma izumiti, če ga ne bi poznali že stoletja.«

Brez dvoma je ogromno livarjev po vsem svetu sodelovalo v dejavnostih z namenom izboljšanja proizvodnih postopkov in tehničnih lastnosti sive litine, še posebej pa zlitin železa in Fe-C-Si-X.

Naj omenim nekaj znanih zbirk znanj, skupaj z avtorji in njihovimi sodelavci:

- E. Piwowarsky (D) 1929 in 1951 [4]
- W. Patterson (D) 1960 [5]
- C.W. Walton (US) 1957 in 1962 [6]
- H.T. Angus (GB) 1960 [7]
- O. Liesenberg in D. Wittekopf (D) 1992 [8]
- F. Neumann (D) 1994 [9]
- W. Bauer (A) 2013 [10]

Dolgoročno in kritično letno ocenjevanje idej z vsega sveta s področja specializiranih livarskih tehnik od leta 1964 pa do danes so predlagali in izvedli P. Schneider in W. Standke, VDG Düsseldorf: Jahresübersichten des Giessereiwesens. Največji delujoči strokovnjaki na področju sive litine so: H.F.W. Hauptvogel, W. Weis in R. Deike: Giesserei 101 (2014), št. 1, str. 101–102.

Na podlagi strukturnih raziskav [h] Laplanche (F) 1947 [11], raziskav materialov A. Collaud (CH) 1954/55 [12]

percentage of production (1970 in Germany 77 %, 2014 57 %) is the excellent combination of mechanical, physical and technological properties.

Some technical aspects shows fig. 2 [3]. A further important reason for the wide spread application is the economical production.

Prof. W. Patterson, my teacher in Aachen, said: „Grey cast iron (Grauguss) is such an ideal material, that it should be invented at once, if it would not been known already since many hundred years.“

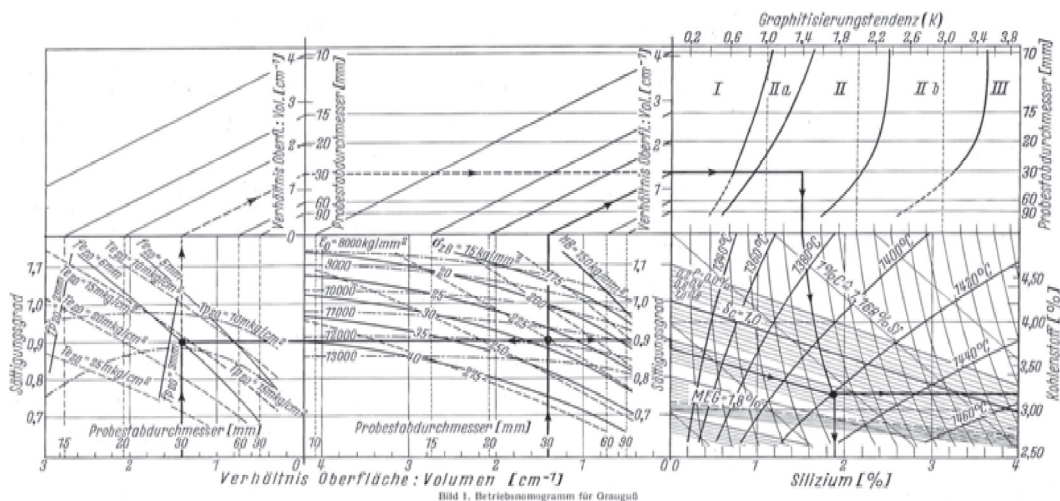
No question, that a lot of foundrymen around the world were engaged to improve production procedures and technical properties of grey cast iron and generally iron based Fe-C-Si-X-alloys.

Some well known books as examples for concentrated knowledge shall be mentioned with respect to the authors and their coworkers:

- E. Piwowarsky (D) 1929 and 1951 [4]
- W. Patterson (D) 1960 [5]
- C.W. Walton (US) 1957 and 1962 [6]
- H.T. Angus (GB) 1960 [7]
- O. Liesenberg and D. Wittekopf (D) 1992 [8]
- F. Neumann (D) 1994 [9]
- W. Bauer (A) 2013 [10]

A remarkable continuous and critical annual observation of actual publications worldwide concerning special fields of foundry technique since 1964 up to the presence was proposed and realized by P. Schneider and W. Standke, VDG Düsseldorf: Jahresübersichten des Giessereiwesens. The acting experts for grey cast iron are H.F.W. Hauptvogel, W. Weis and R. Deike: Giesserei 101 (2014), Nr. 1, S. 101-102.

Based on structural investigations of H. Laplanche (F) 1947 [11], material investigations of A. Collaud (CH) 1954/55 [12] and metallurgical equilibrium



Slika 3: Shema delovanja za sivo litino [14]

Figure 3: Operating diagram for grey cast iron [14]

in raziskav metalurškega ravnotežja W. Oelsen, K. Roesch in K. Orths (D) 1955 [13] sta W. Patterson in R. Döpp (D) 1960 [14] razvila shemo delovanja za sivo litino »Betriebsnomogramm für Grauguß«: Sl. 3.

Širok razpon mehanskih lastnosti je mogoče po A. Collaud [12] razdeliti na glavne statične lastnosti, in sicer natežno trdnost, trdoto in prožnostni modul (prikazano spodnjem srednjem delu Sl. 3) ter lastnosti v povezavi z voljnostjo in žilavostjo, elastičnim ter plastičnim upogibkom in udarno trdnostjo ali odpornostjo na udarce na drugi strani (v spodnjem levem delu Sl. 3).

Lastnosti niso ločljive in so v celoti odvisne od kemijske sestave in pogojev ohlajanja. Ti dejavniki v prvi vrsti vplivajo na metalografske strukture ulitka in v drugi tudi na lastnosti.

V Sl. 3 je vodoravna os, ki prikazuje hitrost ohlajanja, opredeljena kot razmerje O/V = površina/prostornina v cm^{-1} , kot sta določila W. Patterson in F. Iske [15].

Na navpični osi je kemijska sestava opredeljena kot stopnja nasičenost

investigations of W. Oelsen, K. Roesch and K. Orths (D) 1955 [13], W. Patterson and R. Döpp (D) 1960 [14] developed the »Betriebsnomogramm für Grauguß«: fig. 3.

The wide range of mechanical properties may be divided, following A. Collaud [12], into the main static properties tensile strength, hardness and modulus of elasticity on the one side (in fig. 3 middle of the lower part) and the ductility and toughness properties as elastic and plastic deflection and impact strength or impact resistance on the other side (in fig. 3 lower part left).

All properties belong together and depend in detail on chemical composition and cooling conditions. These factors influence at first the metallographic structure of the casting and secondly all properties.

In fig. 3 on the horizontal axis the cooling rate is defined as ratio O/V = surface/volume in cm^{-1} following W. Patterson and F. Iske [15].

On the vertical axis the chemical composition is defined by the degree of saturation

$$SC = C/(4,23 - 0,312 Si - 0,275 P)$$

po A. Collaud [12], ter občasno ali pogosto uporabljena formula

$$SC = C/[4,23 - 1/3 (Si + P)].$$

Za spreminjanj mehanskih lastnosti 34 talin sive litine po A. Collaud [12] s Sl. 3 sta W. Patterson in R. Döpp [14] uporabila razmerja po P.A. Heller in H. Jungbluth Sl. 4 [16] ter pridobila krivulje, ki predstavljajo različne hitrosti ohlajanja: Sl. 5 + 6. Vse podrobnosti o transformaciji so zapisane v izvirni izdaji [14].

Eden izmed glavnih ciljev Sl. 3 je grafična določitev C in Si s presečiščem stopnje nasičenosti SC (oglejte si zgoraj) s stopnjo grafitizacije $K = 4/3 \% Si \times [1 - (5/(3 \% C + \% Si))]$ po H. Laplanche [11], primerjajte

$$SC = C/(4,23 - 0,312 Si - 0,275 P)$$

following A. Collaud [12], briefly and frequently used

$$SC = C/[4,23 - 1/3 (Si + P)].$$

Transforming the mechanical properties of the grey cast iron materials of 34 melts of A. Collaud [12] into fig. 3, W. Patterson and R. Döpp [14] used the relations of P.A. Heller and H. Jungbluth fig. 4 [16] to get representative lines for the different areas of cooling rate: fig. 5 + 6. All details of transformation are discussed in the original publication [14].

One main aim of fig. 3 is to determine C and Si graphically by section point of degree of saturation SC (see above) with degree of graphitization $K = 4/3 \% Si \times [1 - (5/(3 \% C + \% Si))]$ according to H. Laplanche [11], compare [17]. A new version of fig. 3 is fig. 7 with Ledeburit and Osannit.

Example here: If a customer wants a tensile strength of 280 N/mm² in a casting

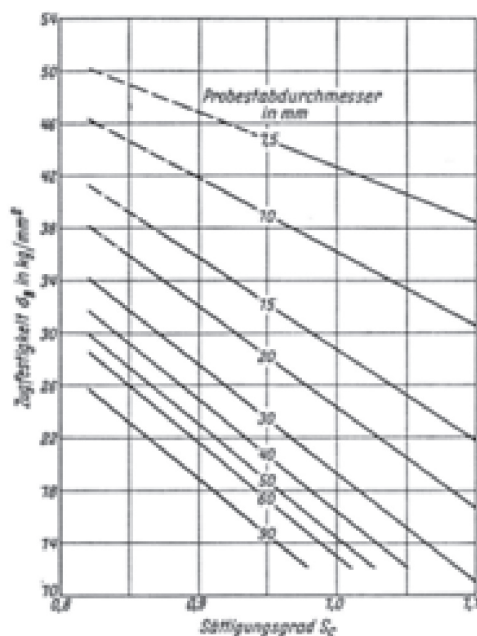


Bild 6. Berechnete Zusammenhänge zwischen der Zugfestigkeit und dem Sättigungsgrad des grauen Gießeisen in Abhängigkeit vom Probestabdurchmesser

Die Gleichungen der Bezugsgeraden des Bildes 6 lauten:

- Für den Stab Dmr. 7,5 mm $\sigma_B = 84 - 41,5 \cdot S_c$
- Für den Stab Dmr. 10,0 mm $\sigma_B = 92 - 48,5 \cdot S_c$
- Für den Stab Dmr. 15,0 mm $\sigma_B = 99 - 70 \cdot S_c$
- Für den Stab Dmr. 20,0 mm $\sigma_B = 101 - 77 \cdot S_c$
- Für den Stab Dmr. 30,0 mm $\sigma_B = 102 - 82,5 \cdot S_c$
- Für den Stab Dmr. 40,0 mm $\sigma_B = 101,5 - 85 \cdot S_c$
- Für den Stab Dmr. 50,0 mm $\sigma_B = 100,5 - 85 \cdot S_c$
- Für den Stab Dmr. 60,0 mm $\sigma_B = 99 - 85 \cdot S_c$
- Für den Stab Dmr. 90,0 mm $\sigma_B = 95 - 85 \cdot S_c$

Slika 4 / Figure 4

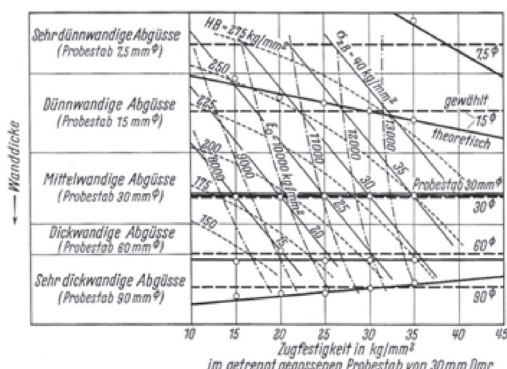


Bild 2. Repräsentative Linien im Collaudschen Normungsdiagramm für die mechanischen Haupteigenschaften von Grauguß

Slika 5 / Figure 5

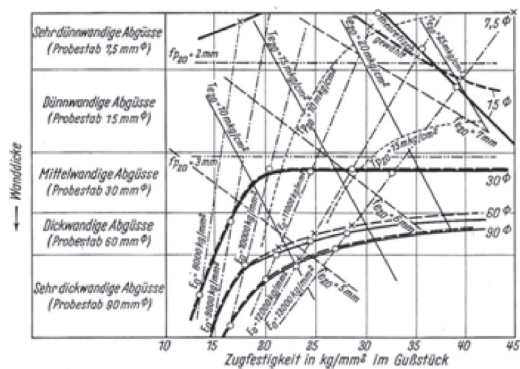


Bild 3. Repräsentative Linien im Collaudschen Normungsdiagramm für die Duktilitäts- und Zähigkeitseigenschaften von Grauguß

Slika 6 / Figure 6

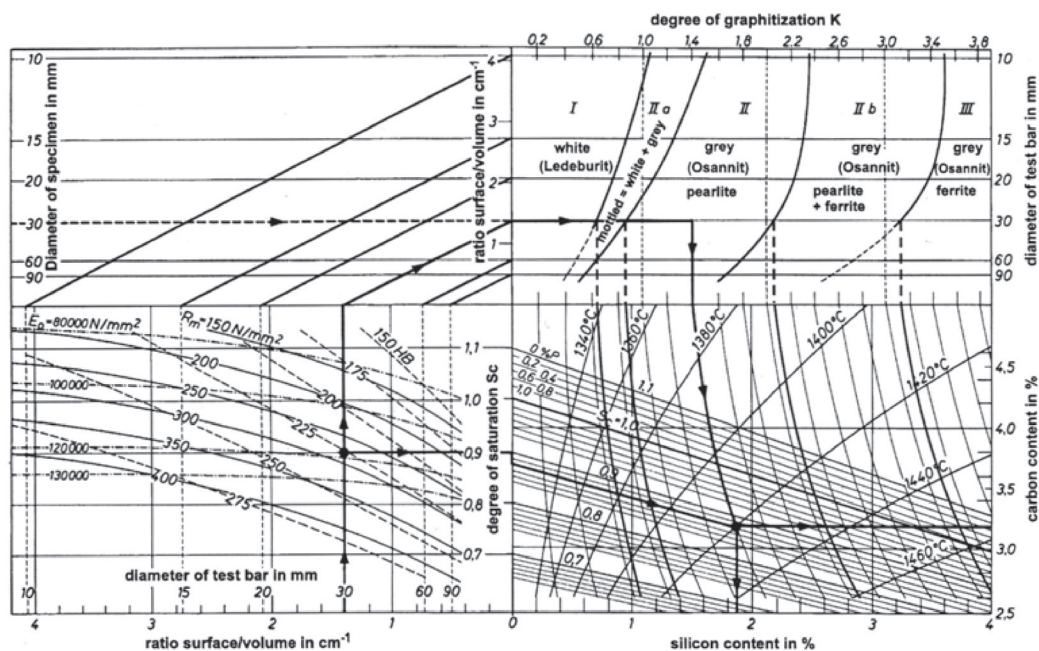


Figure 1 Floor diagram for cast iron to determine C and Si by S_C and K [7-10]

Slika 7 / Figure 7

Vir / Source: R. Döpp: Contribution ... 66th WFC 2004 Istanbul, Turkey

s [17]. Nova različica Sl. 3 je prikazana na Sl. 7 z ledeburitom in osanitom.

with about 15 mm wall thickness, the founder has to choose $SC = 0.9$ and $K = 1.4$. The

Primer: če potrebuje stranka natezno trdnost 280 N/mm² v ulitku z debelino stene pribl. 15 mm, mora livar izbirati med SC = 0,9 in K = 1,4. Presek vodi do vsebnosti 3,2 % C in 1,9 % Si ter ravnotežne temperature pribl. 1420 °C. Posledično znaša trdota 225 HB in prožnostni modul E₀ skoraj 120.000 N/mm².

Vse lastnosti s Sl. 3, 5 in 7 so skladne z zbirno formulo po A. Collaud [12]:

natezna trdnost

R_m je zmnožek prožnostnega modula E₀ in trdote HB

$$R_m = \alpha \times E_0 \times HB \times 10^{-6} \text{ in N/mm}^2$$

$$R_m = 10 \times E_0 \times HB \times 10^{-6} \text{ in N/mm}^2$$

Posledično je R. Mitsche [18] razmišljal o slavni trditvi po Collaud-Point: Sl. 8. Prikazuje:

cross section leads to 3,2 % C and 1,9 % Si and an equilibrium temperature of about 1420 °C. The corresponding hardness is about 225 HB, the modulus of elasticity E₀ nearly 120.000 N/mm².

All combined properties in fig 3, 5 and 7 follow the summarizing equation of A. Collaud [12]:

tensile strength

R_m is the product of modulus of elasticity E₀ and hardness HB

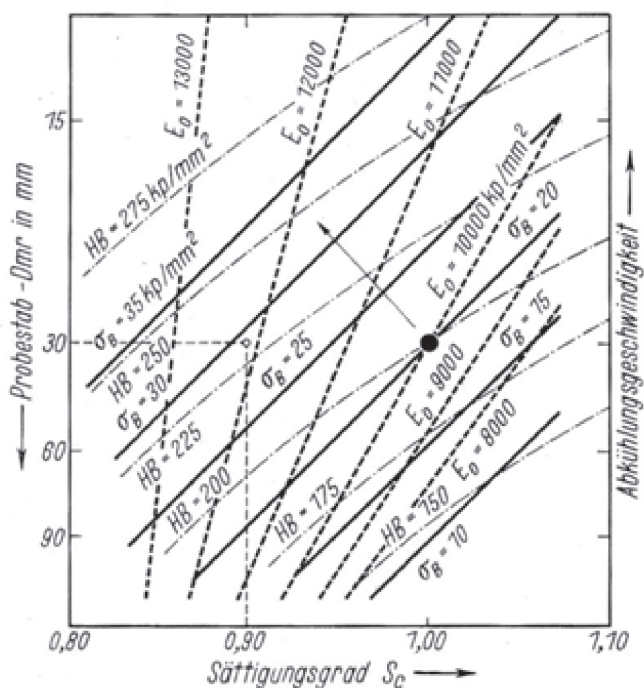
$$R_m = \alpha \times E_0 \times HB \times 10^{-6} \text{ in N/mm}^2$$

$$R_m = 10 \times E_0 \times HB \times 10^{-6} \text{ in N/mm}^2$$

Consequently R. Mitsche [18] discusses the famous Collaud-Point: fig. 8. It shows:

An eutectic melt (SC = 1,0) poured into a mould for a casting with 15 mm wall thickness (test bar 30 mm diameter) leads to

$$R_m = \alpha \times E_0 \times HB \times 10^{-6} \text{ in N/mm}^2 =$$



Slika 8: Razmerje med mehanskimi lastnostmi sive litine (E₀, HB, R_m) in glavnimi dejavniki, ki vplivajo nanje (SC in hitrost ohlajanja) [18]

Figure 8: Relation between the mechanical properties of grey cast iron (E₀, HB, R_m) and the main influencing factors (SC and cooling rate) [18]

Evtetična talina (SC = 1,0) izlita v kalup za ulitek z debelino stene (preizkusna palica s premerom 30 mm), vodi v do

$$R_m = \alpha \times E_0 \times HB \times 10^{-6} \text{ v N/mm}^2 = 10 \times 100.000 \times 200 \times 10^{-6} = 200 \text{ N/mm}^2$$

To je razvidno s Slik 3, 5 in 7.

Shema delovanja iz leta 1960 (Sl. 3) je bila leta 1979 [19] izboljšana z dodatkom standardiziranih razredov sive litine v skladu s standardom DIN 1692, ki se danes imenuje DIN EN 1561 (avgust 1997): Sl. 9 s 4 primeri razredov in lastnosti [19]. Zadnja različica (2016) je prikazana na Sl. 10 (še neobjavljena).

S Sl. 11 [17] je povsem jasno, da na strukturo in lastnosti ne vpliva stopnja nasičenosti SC, ampak stopnja grafitizacije K. Presečišče SC in K na Sl. 3 označuje, kako se SC razdeli na C in Si skladno z želenimi in potrebnimi mehanskimi lastnostmi, kot je zapisano zgoraj.

Na splošno je mogoče razmerje med K in strukturo določiti kot funkcijo debeline stene x mm in ustreznega posebej ulitega

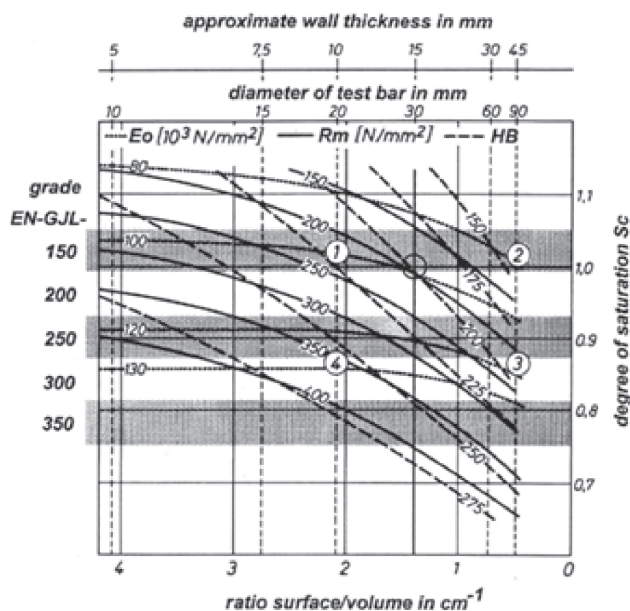
$$= 10 \times 100.000 \times 200 \times 10^{-6} = 200 \text{ N/mm}^2$$

This can already be seen in fig. 3, 5 and 7.

The original floor diagram 1960 (fig. 3) was improved 1979 [19] by adding the standardized grades of grey cast iron according to DIN 1692, today DIN EN 1561 (Aug. 1997): fig. 9 with 4 examples of grades and properties [19]. The last version (2016) is fig. 10 (not yet published).

Regarding fig. 11 [17] it is quite clear, that not the degree of saturation SC, but the degree of graphitization K determines structure and properties. The section point of SC and K in fig. 3 indicates, how SC is splitted into C and Si, depending on the wanted and necessary mechanical properties, as discussed above.

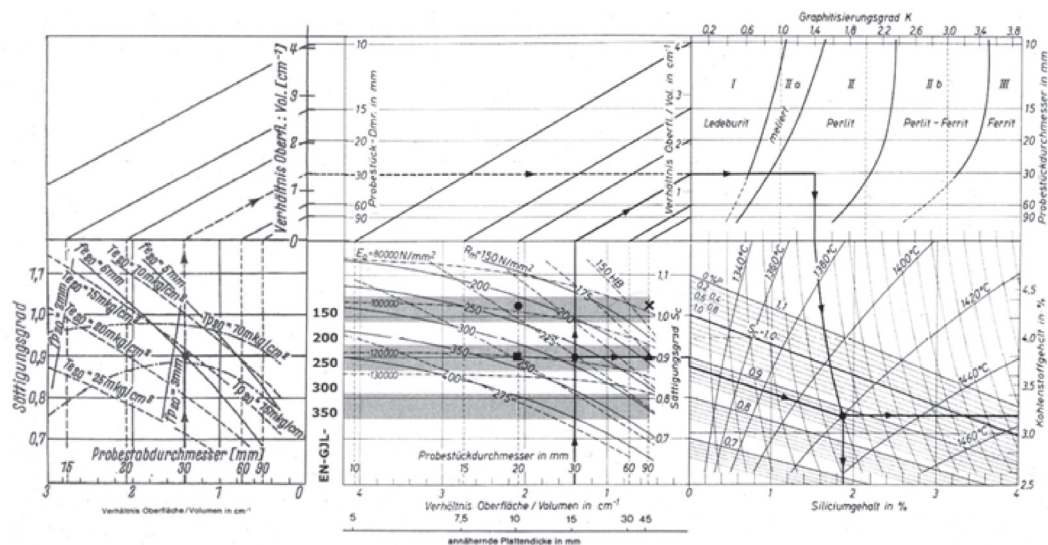
Fig. 12 [17] shows the general relation between K and structure as a function of wall thickness with x mm and corresponding separately cast specimen with diameter 2 x.



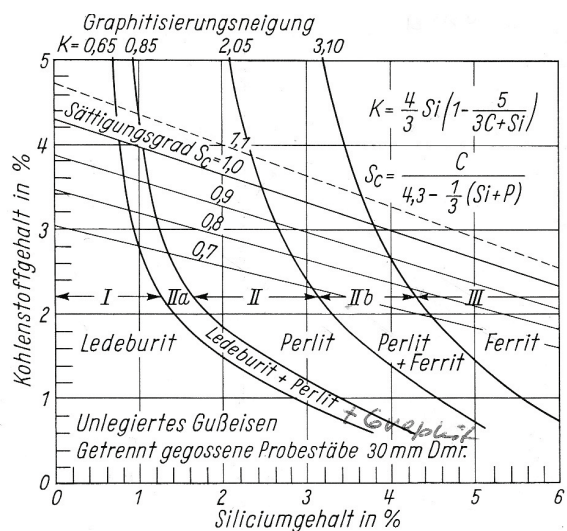
Slika 9: Izboljšana shema delovanja za sivo litino, vodoravne površine predstavljajo razrede natezne trdnosti po EN-GJL-150 do 350 v skladu s standardom DIN EN 1561 (1997).

Figure 9: Improved operating diagram for grey cast iron with horizontal areas for the tensile grades EN-GJL-150 to 350 according to DIN EN 1561 (1997).

Vir / Source: R. Döppa: Prispevek k razvoju litih materialov. 66th World Foundry Congress 2004, Istanbul, Turčija.



Slika 10 / Figure 10



Slika 11: Vpliv kemijske sestave (v tem primeru C in Si) in hitrosti ohlajanja (ločeno preizkusna ulita palica s premerom 30 mm) na strukturo ulitkov iz materialov Fe-C-Si [17]. Strukturo določata stopnja grafitizacije K in hitrost ohlajanja

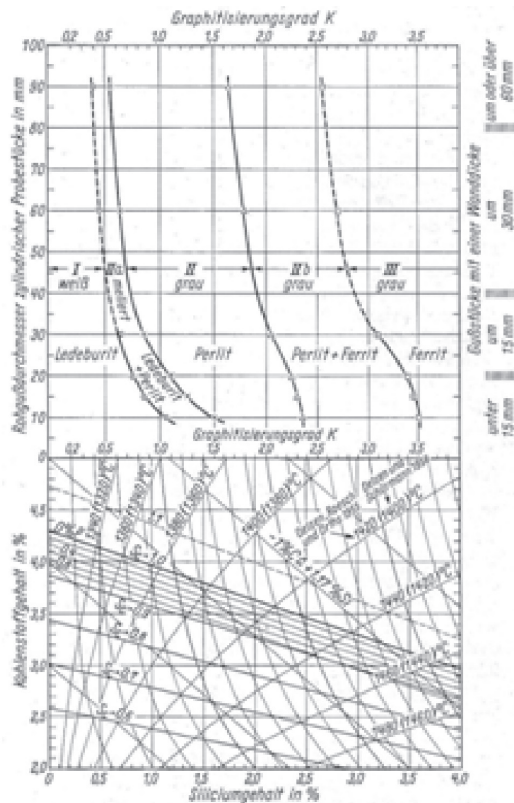
Bild 3. Gußeisenschaubild für getrennt gegossene 30-mm-Probestäbe und normalen Gießereisand nach H. Laplanche¹¹⁾. Sättigungsgrad nach vereinfachter VDZ-Formel¹²⁾ bei 0% P

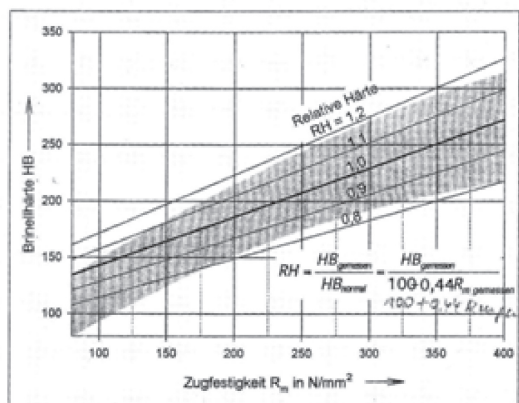
Sättigungsgrad $S_c = \frac{\% C}{4,23 - 0,312\% Si - 0,275\% P}$ nach A. Collaud

Graphitisierungsgrad K nach H. Laplanche¹¹⁾ vgl. (13)

Gleichgewichtsisothermen der Kieselsäurereduktion nach W. Oelsen, K. Roesch und K. Orths [(vgl. auch ¹⁴⁾]

Figure 11: Influence of chemical composition (here C and Si) and cooling rate (here separately cast test bar 30 mm diameter) on structure of cast Fe-C-Si-materials [17]. The degree of graphitization K and the cooling rate determine the structure





Slika 14: Kadar je znana relativna trdota, je mogoče zmanjšati število talitev za izpolnitev zahtev glede razvrščanja po razredih.

Primer: pri $RH = 1,0$ razred trdote EN-HB 195 ustreza razredu natezne trdnosti EN-GJL-200.

Pri $RH = 0,9$ razred trdote EN-HB 195 ustreza razredu natezne trdnosti EN-GJL-250; primerjate z [21]

Figure 14: If relative hardness RH is known, the number of necessary melts to fulfill the requirements of the ordered grades can be reduced.

Examples: With $RH = 1,0$ hardness grade EN-HB 195 can be combined with tensile grade EN-GJL-200. With $RH = 0,9$ hardness grade EN-HB 195 can be combined with tensile grade EN-GJL-250; compare [21]

vzorca z 2-krat večjim premerom kot na Sl. 12 [17].

Sl. 13 [19] prikazuje, kako SC in natezna trdnost določata stopnjo razvoja RG in kako natezna trdnost in trdota po Brinellu določata relativno trdoto RH po W. Patterson [20]. To pa ima poleg praktičnega tudi tehnični in gospodarski pomen. Število proizvedenih razredov sive litine je mogoče v primeru znane vrednosti RH zmanjšati [21].

Lito železo je mogoče razvrstiti na podlagi natezne trdnosti ali po trdoti po Brinellu. Običajno je material EN-GJL-200 enak materialu EN-GJL-HB 195. To pomeni, da meri $RH = 1,0$. Če specifična livarna doseže vrednost $RH = 0,9$, razred trdote EN-HB 195 ustreza razredu natezne trdnosti EN-GJL-250: Sl. 14 [21].

Pri $RH = 1,0$ razredi natezne trdnosti EN-GJL-100 do -350 ustrezajo razredom trdote EN-HB 155 do 255 (Sl. 14) [21].

V vsakem primeru je uporaba toplotne analize za nadzor kakovosti in optimizacijo materiala smiselna [22]. Na področju sive litine predstavljata razmerje podhladitve po K.-H. Caspers [23] in relativna podhladitev po R. Döpp [24] preizkušena kvantitativna načina za ohranjanje kakovosti železnih ulitkov in njeno izboljšanje. Splošni vidiki [23] in [24] so prikazani na Sl. 15 [22].

Fig. 13 [19] shows, how SC and tensile strength determine the degree of maturity RG and how tensile strength and Brinell hardness determine the Relative Hardness RH, following

W. Patterson [20]. This has practical meaning, as well technically and economically. The number of produced grades of grey cast iron can be reduced, if RH is known [21].

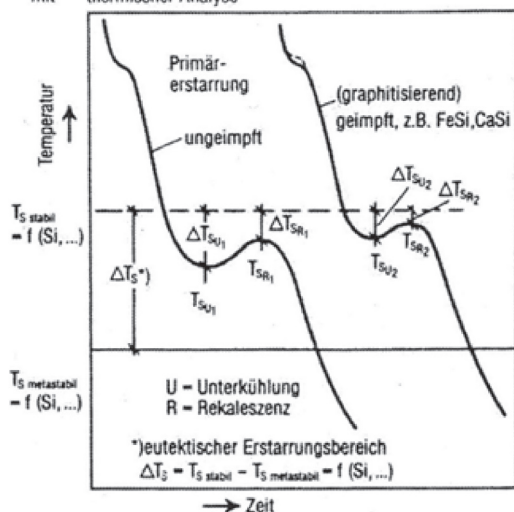
Cast iron may be ordered by tensile strength or Brinell hardness. For instance normally EN-GJL-200 corresponds to EN-GJL-HB 195. This provides $RH = 1,0$. If one distinct foundry reaches $RH = 0,9$, hardness grade EN-HB 195 can be combined with tensile grade EN-GJL-250: fig. 14 [21].

For $RH = 1,0$ the tensile grades EN-GJL-100 to -350 correspond to the hardness grades EN-HB 155 to 255 (fig. 14) [21].

In every case it is reasonable to use the thermal analysis for quality control and material optimizing [22]. In the field of grey cast iron the undercooling ratio of K.-H. Caspers [23] and the relative undercooling of R. Döpp [24] are proved quantitative ways to ensure and to improve the quality of iron castings. The general ways of [23] and [24] shows fig. 15 [22].

In their thesis work H. Schlingloff [25] and J. Pupava [26] investigated grey cast

Vorschlag zur Prüfung von Rohstoffen, Gattierungen, Schmelzen mit thermischer Analyse



1) Unterkühlungsquotient nach K. H. Caspers

$$= \frac{\text{Unterkühlung ungeimpft}}{\text{Unterkühlung geimpft}} \quad \text{z.B. } \frac{1150 - 1130}{1150 - 1140} =$$

$$= \frac{T_{S \text{ stabil}} - T_{S_{U1}}}{T_{S \text{ stabil}} - T_{S_{U2}}} \quad (\text{hier}) \frac{20}{10} = 2 \quad (\text{Soll } 1,5 - 2,5)$$

Annahme (Voraussetzung): $T_{S \text{ stabil}}$ rd. 1150 °C

2) Si-bezogene oder

Relative Unterkühlung (Vorschlag R. Döpp)

= Unterkühlung ungeimpft bzw. geimpft bezogen auf Si-abhängiges Graphitisierungsintervall ΔT_S

$$\text{z.B. } \frac{\Delta T_{S_{U1}}}{\Delta T_S = f(\text{Si})}, \frac{\Delta T_{S_{R1}}}{\Delta T_S = f(\text{Si})}, \frac{\Delta T_{S_{U2}}}{\Delta T_S}, \frac{\Delta T_{S_{R2}}}{\Delta T_S}, \text{ Quotient der Quot.}$$

Slika 15: Razmerje podhlajanja po K.-H. Caspers [23] in relativna podhladitev po R. Döpp [24] sta praktična in preizkušena načina za določanje in optimizacijo kakovosti talin v železnih ulitkov.

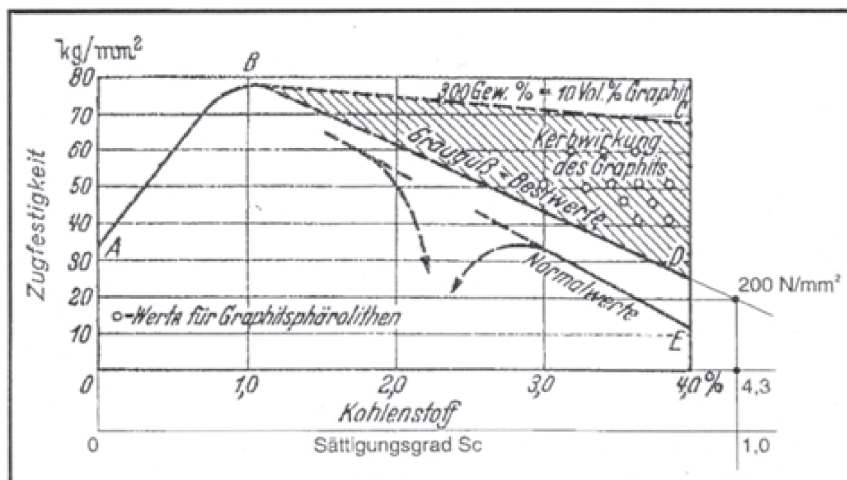
Figure 15: Undercooling ratio of K.-H. Caspers [23] and relative undercooling of R. Döpp [24] are practical and proved ways to determine and optimize the quality of melts and iron castings

V svojem doktorskem delu sta H. Schlingloff [25] in J. Pupava [26] raziskovala sive litine, stališne v kupolki na vroč zrak [25] in v indukcijski peči [26]. Oba potrjujeta, njuna mnenja se namreč razhajata zgolj v nekaj podrobnostih, splošni vpliv kemijske sestave in pogojev ohlajanja na mehanske lastnosti železnih ulitkov, podoben dognanjem A. Collaud [12]. To predstavlja tudi vzpodbudno potrditev sheme delovanja po W. Patterson in R. Döpp glede sive litine [3]. Podrobnosti o učinkujočih dejavnikih in izhajajočih mehanskih lastnostih so povzete v literaturi, npr. [27].

Nedavno je prišlo do neverjetnega odkritja, kot so že zapisali J. Czikel, G. Gaede in G. Gurbaxani v letu 1971 [28], glede splošnega razmerja med R_m / HB in številom evtektičnih celic ter odpornostjo litega železa na udarce. To predstavlja povezavo z neprecenljivim delom Collauda

iron melted in hot blast cupola [25] and induction furnace [26]. Both confirm, with some differences in details, the general influence of chemical composition and cooling conditions on the mechanical properties of iron castings similar to A. Collaud [12]. This is also an encouraging confirmation to the floor diagram of W. Patterson and R. Döpp for grey cast iron [3]. Details of the influencing factors and the resulting mechanical properties are summarized in literature, for instance [27].

An amazing observation recently was, that J. Czikel, G. Gaede and G. Gurbaxani already in 1971 [28] had found the general relation between ratio R_m / HB and the number of eutectic cells and the impact resistance of cast iron. This is a connection to Collauds valuable work [12], also to K.-H. Caspers [23]. Furthermore it supports some



Slika 16: Vizija E. Piowowskyja glede izboljšanja natezne trdnosti sive litine in dejansko stanje [30]

Figure 16: Vision of E. Piowowsky to increase tensile strength of grey cast iron and present reality [30]

[12] in tudi K.-H. Caspera [23]. Prav tako potrjuje nekatere trditve prispevkov avtorjev iz Portoroža leta 2015 [29].

Nenazadnje: vizija E. Piowowskyja glede izboljšanja natezne trdnosti sive litine (Sl. 16) se je uresničila na dveh področjih: včasih najboljše vrednosti kosmičaste (lamelarne) sive litine so sedaj samo srednje visoke: $R_m = 1000\text{--}800 \text{ SC v N/mm}^2$.

Prav tako je razvoj na področju nodularnega (kroglastega) litega železa znatno izboljšal natezno trdnost in voljnost.

considerations of the author's contribution in Portorož 2015 [29].

Finally: The vision of E. Piowowsky concerning the improvement of tensile strength of grey cast iron (fig. 16) is fulfilled in two fields: The former best values of flake (lamellar) grey cast iron are now medium values: $R_m = 1000 - 800 \text{ SC in N/mm}^2$.

Furthermore the development of nodular (spheroidal) graphite cast iron has significantly increased the tensile strength and ductility.

3 Viri / Literature

- [1] Bundesverband der Deutschen Giesserei-Industrie (BDG), Düsseldorf 2009
- [2] Modern Casting, ZDA, december 2015.
- [3] Zentrale für Gussverwendung (ZGV): Leitfaden für Gußkonstruktionen. Giesserei-Verlag, Düsseldorf 1966, str. 14.
- [4] E. Piowowsky: Hochwertiger Grauguß, Berlin 1929. 2. Aufl. Aachen: Gußeisen, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1951, Nachdruck 1961.
- [5] W. Patterson und Mitarbeiter, Aachen: Der Werkstoff Gußeisen. In: Handbuch der Gießereitechnik, Hrsg. F. Roll, Duisburg, Band 1, Teil 2. Berlin/Göttingen/Heidelberg 1960.

- [6] C.F. Walton (Editor): The gray iron castings handbook. Gray Iron Founders Society Inc. Cleveland, Ohio, USA 1957. 2. Aufl. 1962. Deutsche Ausgabe VDG Düsseldorf: Gusseisen-Handbuch, übersetzt und bearbeitet von W. Patterson und Mitarbeitern in Aachen, Gießerei-Verlag Düsseldorf 1963.
- [7] H.T. Angus: Physical and Engineering Properties of Cast Iron, BCIRA, British Cast Iron Research Association, Alvechurch, Birmingham, England, 1960
- [8] O. Liesenberg und D. Wittekopf: Stahlguß- und Gußeisenlegierungen. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie GmbH Leipzig 1992.
- [9] F. Neumann: Gußeisen – Schmelztechnik, Metallurgi, Schmelzbehandlung. expert verlag, Renningen-Malmsheim 1994.
- [10] W. Bauer: Gußeisen mit Lamellengraphit – Metallurgie, Gefüge- und Werkstoffkunde von Grauguß für Anwender. Österreichisches Gießerei-Institut, Leoben 2013.
- [11] H. Laplanche: Metal Progr. 52 (1947), str. 991–993; 55 (1949), 839–841.
- [12] A. Collaud: Giesserei, techn. wiss. Beih., št. 14, 1954, str. 709–726; št. 15, 1955, 767–799
- [13] W. Oelsen, K. Roesch in K. Orths: Archiv Eisenhüttenwesen 26 (1955), S. 641–653
- [14] W. Patterson in R. Döpp: Giesserei 47 (1960), št. 7, str. 175–180; vgl. Giesserei-Kalender 1960, str. 113–117; 1977, str. 54 (skupaj s H. Reuter)
- [15] W. Patterson in F. Iske: Giesserei, techn.-wiss. Beih., št. 22 (sept. 1958), str. 1147–1169; vgl. Giesserei-Kalender 1959, str. 118–121
- [16] P.A. Heller in H. Jungbluth: Giesserei 42 (1955), št. 10, str. 255–257
- [17] W. Patterson in R. Döpp: Giessereiforschung 21 (1969), št. 2, str. 87–93
- [18] R. Mitsche: Giesserei 50 (1963), št. 20, str. 609–610
- [19] R. Döpp: Giesserei 66 (1979), št. 2, str. 40–43
- [20] W. Patterson, Giesserei 45 (1958), št. 14, str. 385–387
- [21] R. Döpp: Giesserei-Praxis 53 (2002), št. 10, str. 375–378; Giesserei-Erfahrungsaustausch 47 (2003), št. 4, str. 138–141; konstruieren + giessen 27 (2002), št. 4, str. 8–9; 28 (2003), št. 4, str. 46
- [22] R. Döpp, D. Blankenagel, K. Lindemann, B. Prinz in Y. Radjef: Giesserei-Praxis 45 (1994), št. 7, str. 141–148
- [23] K.-H. Caspers: Giesserei 61 (1974), str. 20, str. 611–615
- [24] R. Döpp: Giesserei 76 (1989), št. 2, str. 47–53
- [25] H. Schlingloff in R. Döpp: Giesserei-Rundschau 44 (1997), št. 9/10, str. 10–18
- [26] J. Pupava, R. Döpp in F. Neumann: Giesserei 88 (2001), št. 9, str. 40; Giesserei-Praxis 52 (2001), str. 9, str. 373–374; Giesserei-Erfahrungsaustausch 45 (2001), št. 10, str. 428–429; vgl. J. Pupava und R. Döpp: Slevarenstvi 49 (2001), št. 5–6, str. 302–305
- [27] W. Patterson in R. Döpp: Giesserei 60 (1973), št. 2, str. 32–39 Kritik W. Weis: Giesserei 60 (1973), št. 16, str. 503
- [28] J. Czikel, G. Gaede in G. Gurbaxani: predavanje 38. Internationaler Giessereikongress v Düsseldorfu 1971; Giesserei 58 (1971), str. 24, str. 734–747
- [29] R. Döpp: Beitrag Duktilität 55. Internationale Giesserei-Konferenz Portorož 2015
- [30] Beitrag R. Döpp 1. Giessereihistor. Colloquium, Düsseldorf 2005; VDG-Fachbericht 088, 2005, str. 126