

RICHARD KANDZIA
MARIUSZ SZOT

Technological aspects of mining chain production development

This paper presents a brief historical overview of the development and types of mining chains currently in production, as well as their contribution to the global market. The directions of development for mining link chains were identified in terms of the materials and strength parameters applied. The negative influence of certain factors that decrease the performance of mining chains are also demonstrated.

Key words: *chain, safety, durability*

1. INTRODUCTION

The first examples of link chain applications in mining are known from the comprehensive work published in 1556 by Georgius Agricola, titled *De Re Metallica Libri XII*. Book six includes numerous illustrations (Fig. 1) depicting link chains used primarily in vertical bucket elevators intended for pumping water out of underground mines [1, 2].

Link chains replaced hemp ropes which were formerly widespread, but which would quickly decay in damp shaft workings and lose their load capacity. However, the application of chains presented a different disadvantage: damage to a single link would often result in chain failure. Falling chains damaged the structure and lining of shaft ways [3], which ultimately led to the invention of steel ropes in the 19th century.

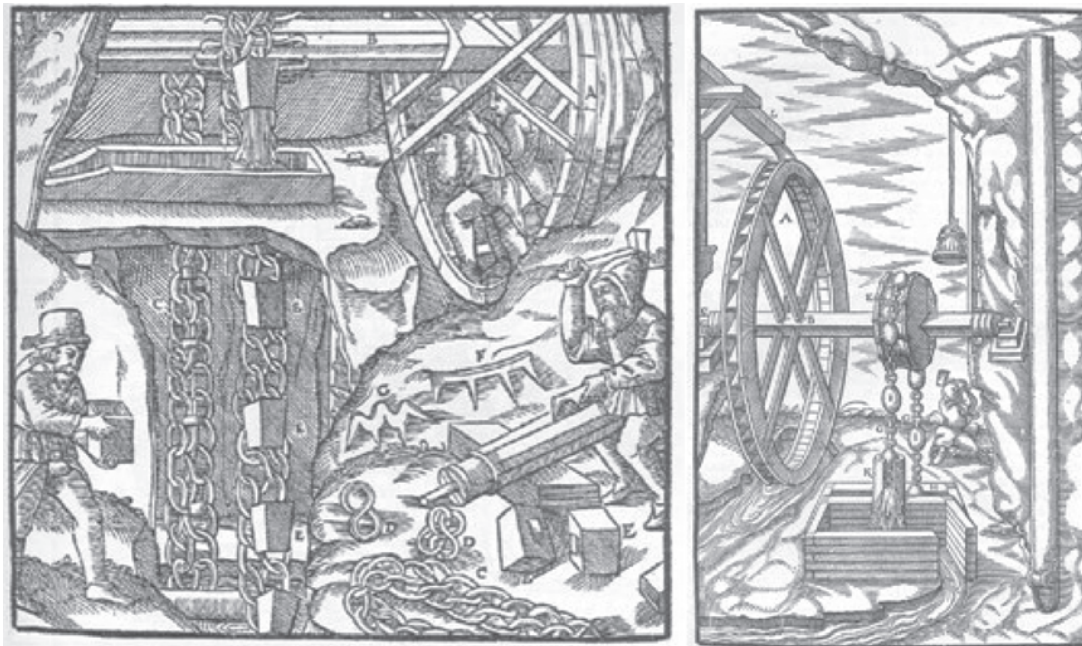


Fig. 1. A bucket chain elevator and a tube chain conveyor [2]

Link chains only saw a resurgence in mining after the introduction of electric link welding – which considerably lowered the production costs and increased the weld quality – and together with the mechanisation of mining processes, particularly with the advent of longwall technology for hard coal deposit extraction.

2. MINING CHAIN DEVELOPMENT

The mechanisation of material transport in hard coal mining began in the 1920s by means of vibrating conveyors, also known as shaker conveyors. The first conveyor utilising a link chain was introduced into mining practice in 1932. It was a retarding disc conveyor, used at inclinations of over 18° (Fig. 2). The purpose of the discs mounted on the chain was to impede the movement of the material rolling down open troughs. Vibrating conveyors and disc conveyors used underground were gradually replaced by chain conveyors [4, 5].



Fig. 2. Retarding disc conveyor

The first chain conveyors were equipped with roller chains, depicted as a diagram in Figure 3 [6]. Such a chain type hindered the relocation of the conveyor, as it allowed the trough track to be bent only in the vertical plane, therefore later conveyor designs began to utilise link chains in the form of strands with dou-

ble outer chains [7]. Initially, these were chains obtained from the shipbuilding industry, e.g. 16×64 mm, i.e. with a pitch equal to four times the diameter, $t = 4 \cdot d$. To increase the conveyor reliability, the chain diameter was increased to 18 mm while retaining a pitch of 64 mm. The chain pitch was retained to preserve the pitch diameter of the drive sprockets and prevent the need to change the drive constructions. On the other hand, the link diameter of 18 mm was the greatest diameter at the time that could be obtained by electrical resistance welding. Only the introduction of flash butt welding in 1952 [6] made it possible to weld chains with greater diameters by means of electric welding. The first longwall chain conveyor equipped with a link chain was tested in the “Bobrek” mine in Upper Silesia, known at the time as “Gräfin-Johanna-Grube”, in 1941 [8, 9].

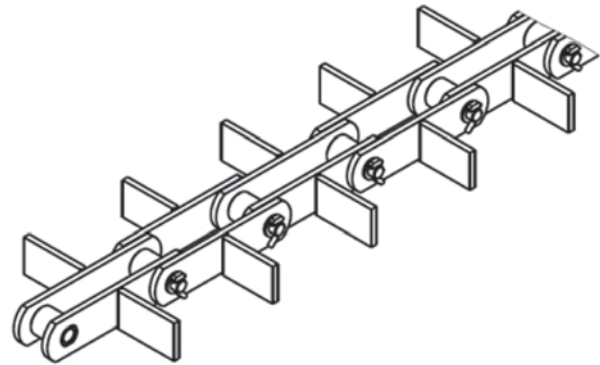


Fig. 3. Example diagram of a roller chain [6]

The demand for hard coal increased after World War II, consequently starting the era of mechanisation in mining. Chains applied in chain conveyors saw a rapid increase in demand, which led to the drafting of the first standard concerning “mining chains”, DIN 22252. Its first edition of March 1951 [10] described only 16×64 mm and 18×64 mm chains.

Initially, mining chains were manufactured in strands of 15 links. The length tolerance was regulated by the standard (+4 mm / -1 mm). It was technologically impossible to produce strands of precisely same length in repeatable series, therefore the 15-link strands were measured and sorted according to the length deviation and subsequently tied into pairs. The pairing of strands with the same length deviation was a result of the using outboard chain assemblies. A typical chain assembly section consists of 2 chain strands, 2 outboard connectors, and 1 scraper (Fig. 4). Depending on the needs, such sections would be com-

bined into series of typical length, e.g. about 10 m, which usually varied based on the logistical capabilities of the user.



Fig. 4. Outboard chain assembly [11]

The development of mining chains was a consequence of increased extraction intensity and the related increased capacity of mining chain conveyors. To increase their operational parameters, the chains were manufactured with gradually increased diameters ($\varnothing 20, 22, 24, 26$ and 30 mm) and progressively better grades of steel [2]. The fourth edition of standard DIN 22252 of December 1973 [12] describes chain sizes that are still in use to this day, e.g. 22×86 mm, 24×87.5 mm, 26×92 mm and 30×108 mm. The 30×108 mm chain was the largest mining chain at the time as well as the first one to be manufactured in long strands and used as a central chain. Initially, the 30×108 mm chain was used as a single central chain, but after the calibration and pairing process was im-

proved, it was also used as a double central chain [13]. The standard [12] introduced a length difference tolerance for strands with lengths of up to 25 m. For a pair of chains, the permissible length difference of both strands was up to 8 mm. The Polish standard PN-G-46701:1997. *Mining link chains* [14] permits a length difference under a test load no greater than 0.15% of the link pitch sum for long chains. Figure 5 presents the history of nominal diameter development for mining chains.

The first type of flat chain was introduced on the market in 1985 [9]. It was a chain with a nominal diameter of 38 mm. All the subsequent chains with greater nominal diameters were flat type chains (Fig. 6), super flat chains or special chains [15]. The 42×137 mm plough chain is an exception in this series, as it was introduced in the form of a regular link chain in 2006. Among the special chains, noteworthy cases include compact chains put into production in the 1980s, whose nominal diameter refers to the horizontal link, whereas the vertical link diameter differs along the link circumference and is typically greater at the bends than the horizontal link diameter. A unique design case includes triple flat chains, whose nominal diameter typically refers to a theoretical computational cross-section. The dates provided in Figure 5 are only approximate, as it is difficult to unanimously declare what should be deemed the date of introduction for a new nominal chain size: the date of the construction design, the patent application, the determination of the manufacturing technology, the first underground use or the inclusion in a standard.

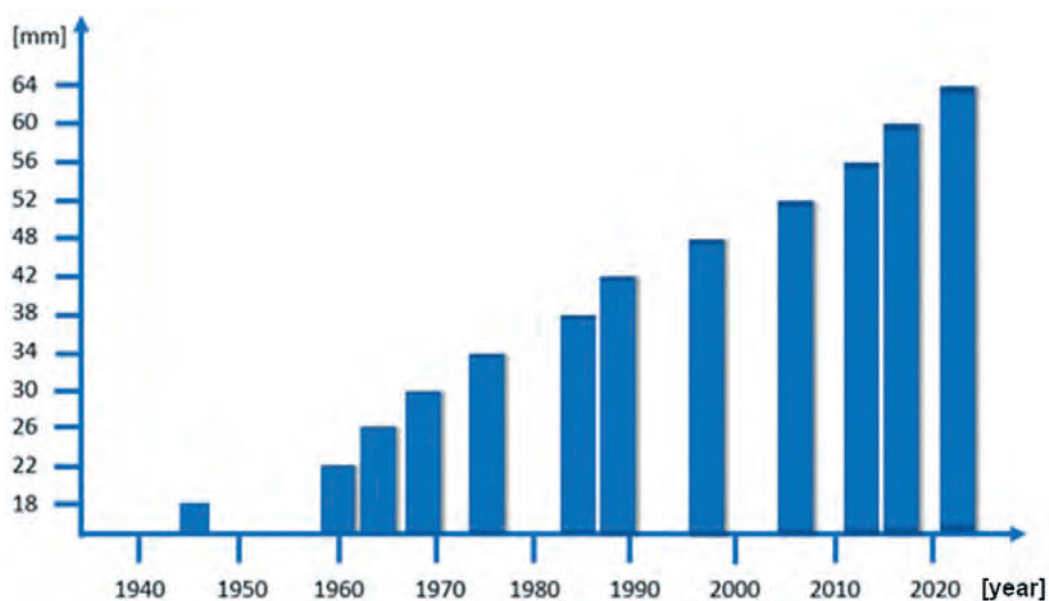


Fig. 5. History of nominal mining chain diameter development

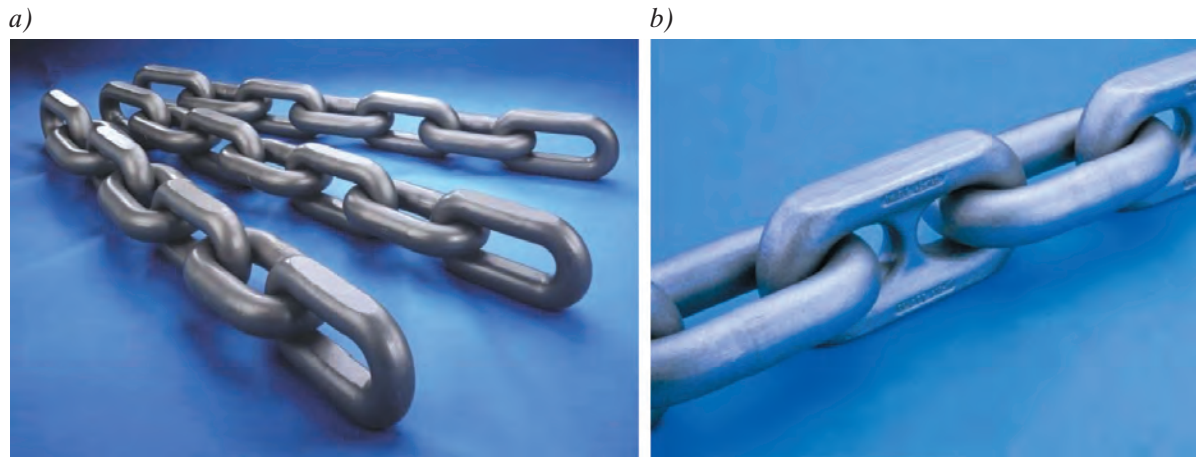


Fig. 6. Chains: a) flat; b) super flat

3. INFLUENCE OF MATERIAL PROPERTIES ON CHAIN PRODUCTION TECHNOLOGY

At the start of the mechanisation period, chains used in mining machines were often still forge welded, i.e. heated in a forge hearth or furnace and forged manually using a hammer. The weld was at the bend, as the welding involved sharp and overlapping bar ends. Welds performed in such a manner did not meet the growing technical needs of the users. The application of resistance welding made it possible to improve the quality of the weld, although its use was limited to links with a bar diameter of 18 mm [6]. Nevertheless, even for mining chains manufactured in this manner, the low quality of the weld was one of the primary reasons for chain failure. Only the introduction of flash butt welding in chain production in 1952 made it possible to significantly improve weld quality. Flash butt welding enabled the development of chains with nominal diameters exceeding $\varnothing 18$ mm. A stable evolution within the scope of chain production can be witnessed since 1940. Market demands resulted in the manufacturing of chains with greater diameters as well as successively increased properties of >900, 1000, 1050, 1100 MPa, which are characterised by significantly higher operational parameters compared to chains per PN and DIN. The applica-

tion of new materials and heat treatment technology made it possible to achieve an optimal and repeatable hardness distribution in each link, as well as to obtain variable hardness in a single link, that is hard bends and plastic straight sections with lower hardness. The type of the applied material and treatment method changed accordingly in successive years, as per the data presented in Table 1.

Currently, the most popular grade of steel used for mining chain production is 1.6758 per the German steel code, that is 23MnNiMoCr54, whose Polish counterpart is called 23G2NMHA. Lower grade steel is often used for chains with link diameters of up to 26 mm, i.e. 23MnNiMoCr52, number 1.6541, whose Polish counterpart is called 23GNMHA. Currently, chain manufacturers utilise the 1.6758 grade of steel with certain modifications concerning the chemical composition.

The chemical composition of the most popular grade of steel used for mining chain production is provided by the relevant standard [16]. The Polish standard [14] does not impose a specific grade of steel on manufacturers. In order to fulfil the requirements of clients in terms of chain strength, fatigue life and the appropriate corrosion protection, chain manufacturers use toughened versions of steel. The publication [17] presents the sample chemical compositions of a 42×137 mm plough chain produced by three different companies (Fig. 7).

Table 1

Type of material and heat treatment

1945	1950	1968	1974	1985	1990	1997
St-35.13K	15Mn3	20MnCr4	23MnNiCrMo64	23MnNiCrMo54	23MnNiCrMo54	23MnNiCrMo54
Natural hardening	Hardening	Hardening and tempering	Hardening and tempering	Hardening and tempering	Double quenching >Ac3	Double quenching >Ac3

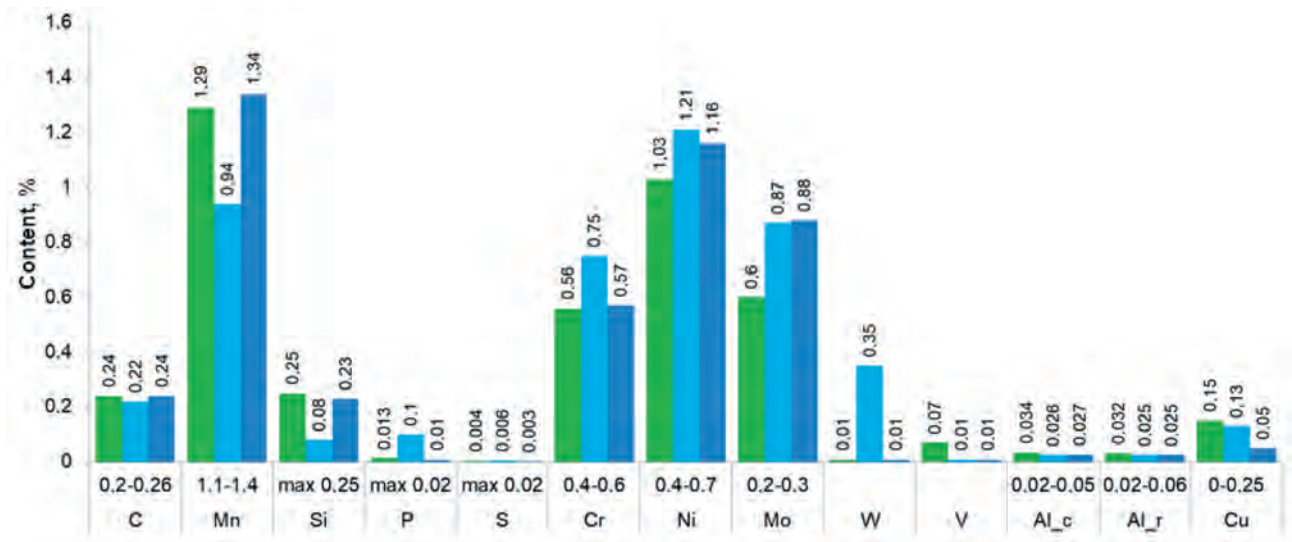


Fig. 7. Example chemical composition of steel

Certain mining chain manufacturers strive to introduce grades of steel on the market that are further improved with the micro-additions of other metals, e.g. wolfram, vanadium, boron and so on. The purpose of these practices is to obtain parameters of steel after heat treatment that would improve the mechanical properties of the mining chains, particularly their impact resistance.

3.1. Influence of material properties on the weldability of steel

The advancements in welding technology led to the development of steel used to form the mining chains. Initially, this included carbon steel (unalloyed), later steel with manganese additions, and only by the end of the 1960s would chain production begin to involve low-alloy steel with manganese, nickel, molybdenum and chromium additions. The first standard describing low-alloy steel for mining chain production was published in 1965. It was the German standard DIN 17115 [18]. Its Polish counterpart is standard PN-89/H-84023/08 [19].

A significant parameter for evaluating the suitability of a given grade of steel for mining chain production is the carbon equivalent C_e . It is a parameter used in welding that expresses the weldability of carbon and low-alloy steel depending on the chemical composition of the steel. It characterises the propensity of a material for developing welding cracks. The carbon equivalent is determined per formula (1) [11]:

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + V + Mo}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \% \quad (1)$$

The lower the C_e , the greater a material's weldability. It is assumed that the carbon equivalent also expresses a material's suitability for flash butt welding. Critical carbon equivalent values for flash welding diverge from those acknowledged for fusion welding and are determined experimentally, which is related to the heating temperature and the diameter of the welded bars. It is assumed that flash butt welding can be performed without risk of cracking up to a value of $C_e = 0.8$, whereas the limit for the carbon equivalent for welding is $C_e < 0.9$ [11]. Contaminations, particularly the sulphur and phosphorus contents, also have a significant influence on the weld quality and a material's capacity for welding. Their combined content should not exceed 0.035%. Aluminium and copper are also undesirable alloying components.

3.2. Influence of material properties on chain galvanisation

The problem of mining chain corrosion was solved by the introduction of hot-dip galvanisation, also known as hot dipping, as the zinc is applied on the chain links by means of a several minute long bath in liquid zinc at a temperature of about 440–460°C. During this bath, the zinc atoms undergo diffusion into the crystalline structure of the steel [20], and the surface irregularities and pores are filled with zinc, which generates a layer which strictly adheres to the chain link surface, known as a zinc and steel (zinc-iron) alloy, with a thickness of about 80–120 μm. The coating is characterised by greater adherence to the base and relatively high abrasion resistance.

The quality of the obtained zinc coatings (lustre, smoothness, thickness, adherence etc.) varies and depends on the chemical composition of the steel, particularly on the carbon (C), phosphorus (P) and silicon (Si) contents. The combined carbon and silicon content in the steel should not exceed 0.5%. For steel containing carbon in the form of martensite, an increase in carbon content within 0.01–2.08 wt% systematically increases the reactivity of steel relative to the liquid zinc without extending the linear range of the reaction course. For steel containing silicon, the zinc and iron reaction may proceed with particular intensity, and the contribution of the zinc-iron alloy in the coating will be greater than usual. In extreme cases, the zinc coating may consist completely of the zinc-iron alloy. This phenomenon (known as the Sandelin effect) is observed particularly at silicon contents within 0.03% to 0.14% as well as above 0.25%.

In such cases, the zinc coating is typically dull grey, rough, non-uniform and brittle – vulnerable to deformations and mechanical damage. The influence of the silicon content on the solubility of steel in liquid zinc is presented in Figure 8 [21]. The silicon used in steelmaking leads to a major increase of its reactivity with liquid zinc, which is particularly high at two concentrations of this element, amounting to about 0.1 wt% and about 0.4 wt%.

The zinc coating properties related to the chemical composition of steel are defined in the relevant standard [22]. Therefore, considering the silicon and carbon contents in steel for chain production, the criteria describing the suitability of steel for hot galvanisation can be defined as follows:

$$C + Si < 0.5\% \quad (2)$$

$$0.1 < Si < 0.25\% \quad (3)$$

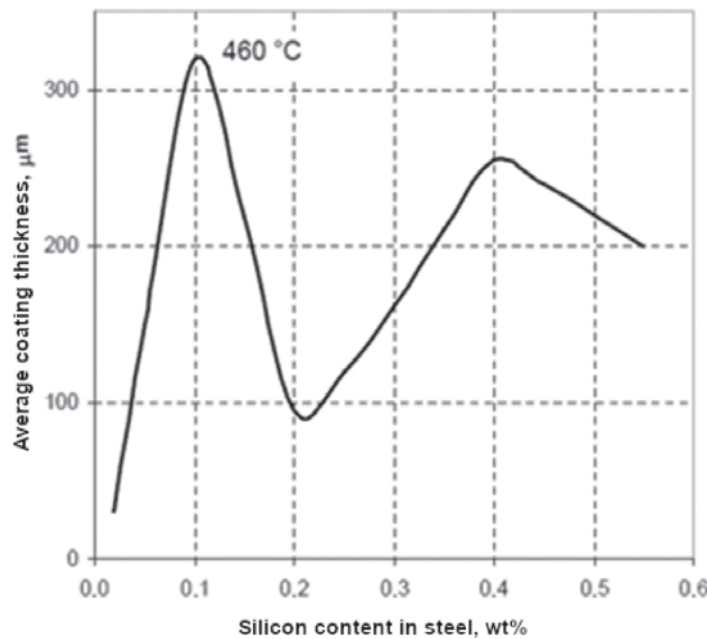


Fig. 8. Influence of silicon on the coating thickness

3.3. The influence of link manufacturing technology on chain strength parameters

For many years, the direction of chain conveyor development has entailed the utilisation of chains formed from thicker bars, better materials and with improved ductility. Initially, experience from mines in western European countries with advanced coal mining demonstrated the validity of this concept. For example [23], in 1983 in France it was shown that a correctly made and selected 26 × 92 mm chain

strand could be used to safely transport 0.6–0.8 Mt of coal under difficult geological and mining conditions, whereas a 34 × 126 mm chain strand could be used for as much as 2.4 Mt of the extracted material. This direction of development led to the production of conveyors with 60 × 189/136 mm chain strands that should be expected to provide even better results. The chart (Fig. 9) presents the progression in the diameter and breaking load values since 1940. As displayed, since 1940 the bar diameter has increased from 16 to 60 mm, while the break load is now 4760 kN.

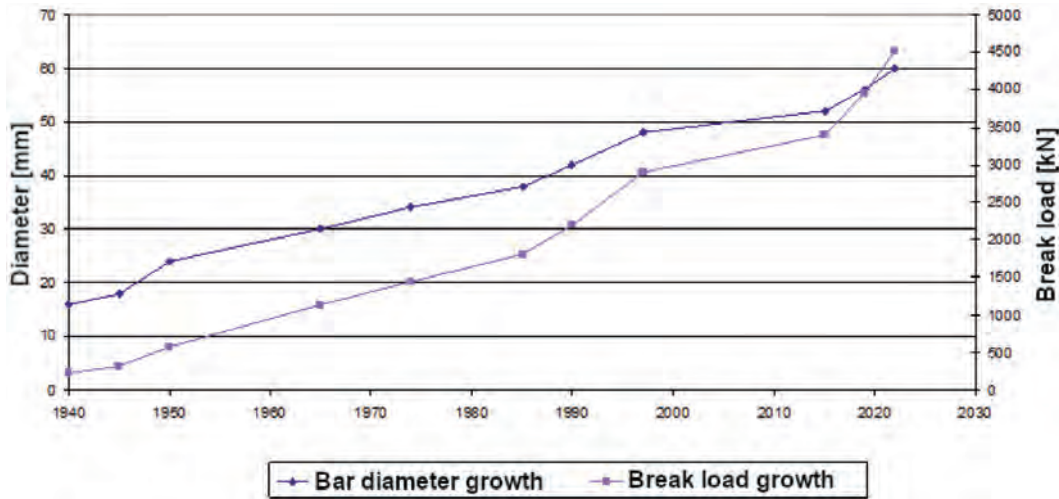


Fig. 9. Strength and geometric parameter progression

3.3.1. Influence of heat treatment on impact resistance

The strength of the steel for chain production has a direct influence on the mining chain quality class, and it depends on the applied heat treatment. A critical step of the multi-stage treatment process, one which determines the final strength parameters, is tempering. In order to identify the relationship between the impact resistance and the tempering temperature of steel for chain production, a series of comparative tests were performed, which compared

samples of 1.6758 steel from four suppliers: A, B, C and D. Figure 10 presents the results of all the tests in the form of charts.

This can best be seen on the example of supplier A that at a temperature range of about 350°C the impact resistance results reach the local minimum, which corresponds to the tempering temperatures of class D chains. High impact resistance values are obtained at tempering temperatures above 450°C, and it is class C chains that undergo tempering at such temperature ranges.

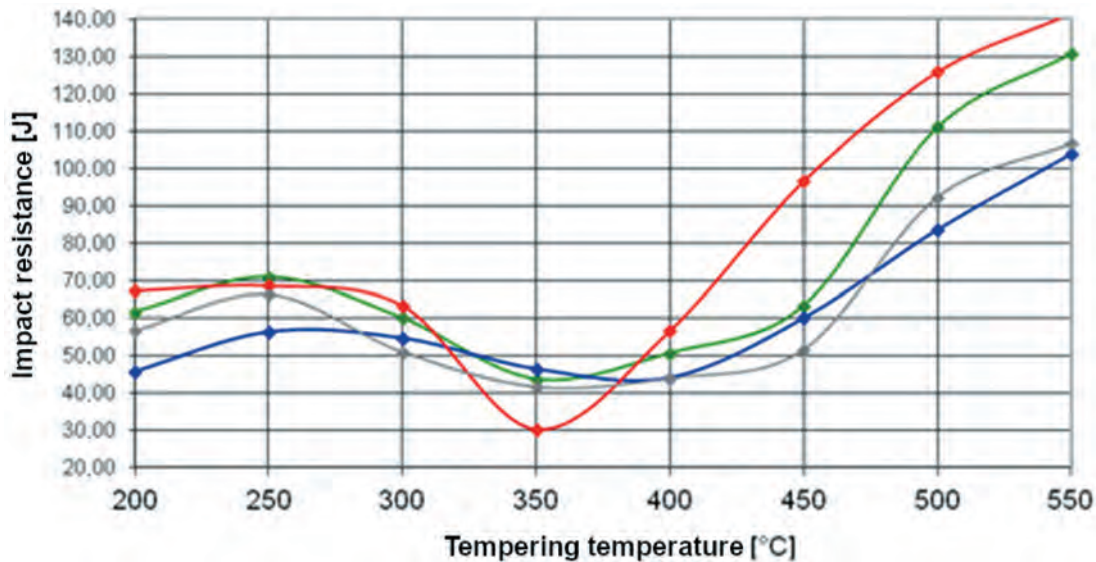


Fig. 10. Test results for impact resistance relative to tempering temperature for steel samples from suppliers A, B, C and D

3.3.2. The influence of the galvanisation process on strength parameters

Experimental tests described in [23] confirmed that hot-dip galvanisation decreases the mechanical prop-

erties of high-strength grades of steel as a result of the additional tempering of the martensitic structure. The key advantage of such steel is the high strength of the material (ductility and tensile strength). Steel

with high silicon, chromium, molybdenum, and manganese content is characterised by high hardness together with high strength. It has a high yield point as well as tensile strength. In the case of this type of steel, the change in the yield point and tensile strength resulting from the hot-dip galvanisation will be considerable. The tests conducted as part of the publication [24] noted a decrease in tensile strength by 17%, whereas 14% was the result obtained as part of the publication [25]. The results described in these works confirm that high-strength steel is only suitable for hot-dip galvanisation when the degree of the strength parameter reduction is known.

4. ANALYSIS OF THE SIZE AND DESIGN OF MINING CHAINS USED IN THE INTERNATIONAL MINING INDUSTRY

The general trend to use increasingly higher nominal mining chain diameters finds confirmation on the example of the volumes produced by one of the leading mining chain manufacturers [26]. The data displayed in Figure 11 is not representative for the total global production, but it nevertheless provides an idea of the approximate percentage contributions of the individual sizes. Periods when specific sizes would dominate the production can be observed when analysing the individual mining markets. On the example of the American market, it can be concluded that the machinery undergoes modernisation about every 10 years, which is followed by a transition to another size of mining chains used in longwall conveyors. In

the 1980s, 34×126 mm link chains were the most popular in the USA, before they were supplanted by flat 38×126 mm chains. After the year 2000, flat 42×146 mm chains were the most commonly applied, whereas after 2010 the market was dominated by chains with a link diameter of 48 mm. Currently, the authors are aware of existing installation modernisation projects aimed at applying chains with a nominal diameter of 52 mm.

The intensification of the production in longwall faces combined with increasingly greater conveyor chain sizes results in an increase of the chain life, measured in tons of transported material, which amounts to a gross weight of 10–12 million tons of material in the case of chains with a nominal diameter of $\varnothing 48$ mm.

In terms of their performance, the mining chain life is primarily limited by the operational conditions, i.e. the coal production intensity, the rock content, the mining conditions, and particularly the prospective occurrence of corrosion, and amounts to 12–24 months regardless of the size and type of the chain.

At the same time, a trend can be observed towards utilising increasingly flatter chains, as a result of adapting their design to the limited dimensions of chain conveyors with the simultaneous increase in the installed electric motor power. The relatively small contribution of triple flat chains visible in Figure 12 is a consequence of their high costs of production and the patent restrictions that limit the possibilities of their circulation. The percentage contribution of specific mining chain types and sizes on individual markets depends on the extraction intensity, the development level of the mining technology and the financial capabilities of the local coal producers.

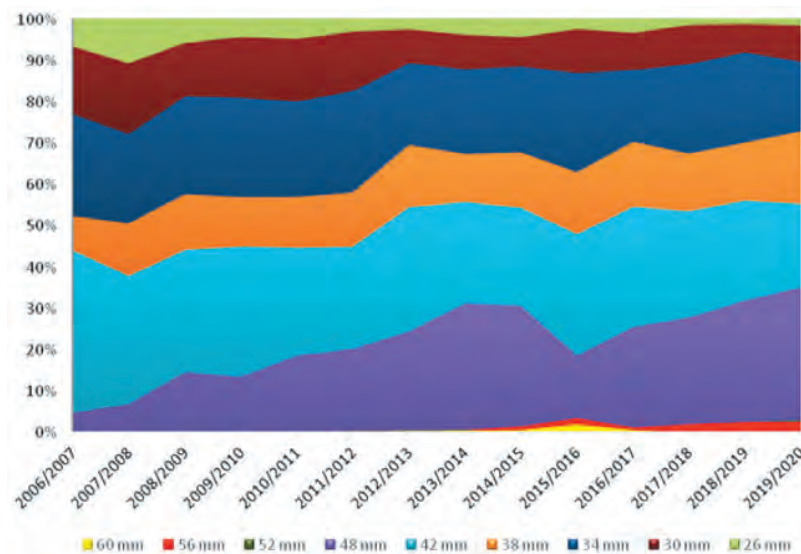


Fig. 11. Percentage contribution of individual mining chain sizes [27]

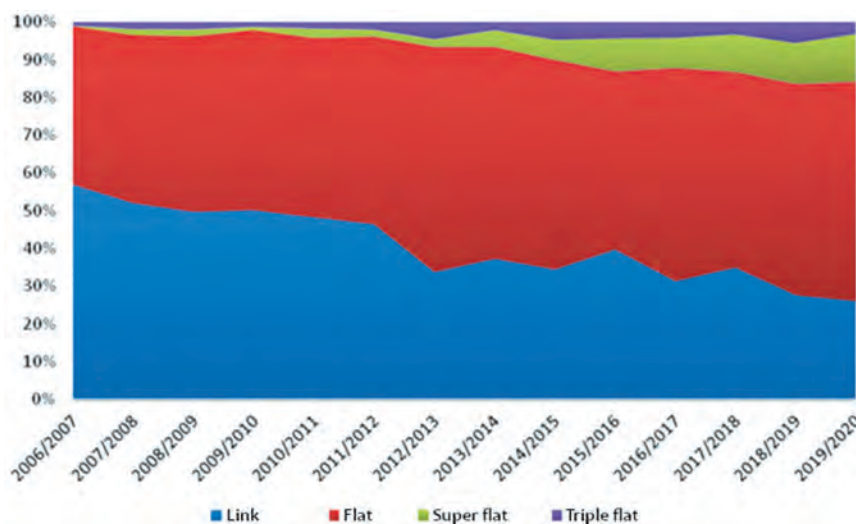


Fig. 12. Percentage contribution of individual mining chain designs on the example of a mining chain manufacturer's overall production [27]

5. CONCLUSIONS

This paper contains a summary of laboratory testing results and the literature review conducted. The first link chains used in mining machinery had a diameter of 16 mm. The smallest chains used in mining conveyors are 14×50 mm, whereas the biggest chains that currently find application in such conveyors have a nominal diameter of 60 mm. Development work is already being conducted on next-generation chains with nominal diameters of 64 mm and $\varnothing 68$ mm. The trend towards increasing the chain diameters has been going on for nearly the last 80 years of mining machinery history, even though it had appeared like a technical limit regarding their production was reached several times already. It also seemed that the application of increasingly greater diameters would not be necessary due to the installation of increasingly powerful motors in chain conveyors and ploughs in order to improve their efficiency. The presented information demonstrates that not every material or type of heat treatment can be used indiscriminately in chain manufacturing. The development of new grades of high-strength steel had a significant influence on the advancements in chain production. Apart from improving the mining chain load-bearing capacity as a consequence of the increased link diameters, the work of the designers and technologists was focused on the following goals:

- to increase the chain strength following the application of new grades of steel,
- to unify the mechanical parameters through precise heat treatment,

- to decrease the vertical link height in combined chains, enabling chain conveyor height reduction,
- to extend chain life by designing links of shapes enabling the slower elongation of chain pitch,
- to obtain repeatable link shapes, particularly in terms of their pitch.

The current trend in development is to design chains equipped with load measurement sensors enabling constant load monitoring as well as chain pre-tensioning control and protection against overloads following the excessive loading or jamming of the conveyor. Work in this scope is being conducted by several research and development centres associated with chain conveyor producers as well as chain manufacturers. Integrating force measurement sensors in a moving conveyor chain is a difficult technical challenge due to the technological barriers pertaining to both the miniaturisation of the measuring system as well as the power supply and the capabilities for measurement data transformation.

Hard coal production by means of longwall mining will remain a major part of the global production of this resource over the next two decades. Given the increase in efficiency and the need to monitor production in order to improve extraction safety, the continued development of the designs and sizes of mining chains should be expected, while the levels of their current demand will remain the same on a global scale.

References

- [1] Agricola G.: *De Re Metallica Libri XII*. Bazylea 1556; *Zwölf Bücher vom Berg- und Hüttenwesen gehören...* Sechstes Buch. Schiffner C., Darmstaedter E. (übersetzt und bearb.). VDI-Verlag, Düsseldorf 1978.

- [2] Philipp G.B., Thiele U., Cooper J.R.: *Eine neue Flachkette mit paßgenauen Kettenrädern für Hochleistungsstreben*. Glückauf 1993, 9: 682–688.
- [3] Philipp G.B.: *Grenzen der Technik – Lebensdauer von Bauteilen – August Wöhlers Schaffen und seine Verdienste*. Bergbau 2008, 5: 224–229.
- [4] Paschedag U.: *Face conveyor systems*. In: Junker M., Lemke M., Heiderich R.-M., Langefeld O., Mozar A., Paschedag U., Philipp G., Witthaus H.: *Technical developments in coal winning*. Vulkan-Verlag GmbH, Essen 2018: 181–224.
- [5] Paschedag U.: *Entwicklungen in der Strebfordertechnik in den letzten 50 Jahren*. Bergbau 2018, 4: 175–182.
- [6] Philipp G.B.: *Die Rundstahlkette als Element der Leistungsübertragung bei Förderern im Strebbau*. RWTH, Aachen 1999 [PhD Dissertation].
- [7] Spies K.: *Leistungsübertragung mit Rundstahlketten*. Glückauf 1993, 6: 411–415.
- [8] Dreher H.: *Górnictwo nie jest sprawą jednego*. XI Międzynarodowa Konferencja Techniki Urabiania „TUR 2019”, Krynica-Zdrój, 17–20 września 2019 r. [conference paper].
- [9] Philipp G.B.: *Conveyor chains, plow chains and flight bars*. In: Junker M., Lemke M., Heiderich R.-M., Langefeld O., Mozar A., Paschedag U., Philipp G., Witthaus H.: *Technical developments in coal winning*. Vulkan-Verlag GmbH, Essen 2018: 225–247.
- [10] DIN 22252, März 1951. *Rundgliederketten*.
- [11] Forch K.: *Werkstoffkundliches Seminar*. Iserlohn, 17.02.2001.
- [12] DIN 22252, Dezember 1973. *Hochfeste Rundstahlketten für den Bergbau*.
- [13] Philipp G.B.: *Chain Matching – The key for high-extraction-rate longwalls*. Glückauf 1998, 2: 24–27.
- [14] Polska Norma PN-G-46701:1997. *Łańcuchy ogniwowe górnice*.
- [15] Kandzia R.: *Kompendium wiedzy o ogniowych łańcuchach górnicych*. Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze 2018, 1(39): 69–76.
- [16] DIN 22252, Juli 2012. *Rundstahlketten für Stetigförderer und Gewinnungsanlagen im Bergbau*.
- [17] Kandzia R., Szot M.: *Fatigue Life Testing of the Round Link Mining Chains*. Management Systems in Production Engineering 2023, 31(1): 78–85.
- [18] DIN 17115, Juli 2021, *Stähle für geschweißte Rundstahlketten und Ketten-Einzelteile – Technische Lieferbedingungen*.
- [19] Polska Norma PN-H-84023-08:1989. *Stal określonego zastosowania – Stal na łańcuchy ogniwowe – Gatunki*.
- [20] American Galvanizers Association: *Hot-Dip Galvanizing – Abrasion Resistance*. <https://galvanizeit.org/hot-dip-galvanizing/why-specify-galvanizing/durability> [4.06.2021].
- [21] Głuszko M.: *Zagadnienia ochrony antykorozyjnej konstrukcji stalowych oraz urządzeń elektroenergetycznych eksploatowanych w warunkach atmosferycznych*. Prace Instytutu Elektrotechniki, z. 235, Instytut Elektrotechniki, Warszawa 2008.
- [22] Polska Norma PN-EN ISO 14713-2:2020-07. *Powłoki cynkowe – Wytyczne i zalecenia dotyczące ochrony przed korozją konstrukcji z żeliwa i stali – Część 2: Cynkowanie zanurzeniowe*.
- [23] Schriever K.: *Neue Antriebssysteme für den Bergbau unter Tage*. Glückauf, z. 235, Instytut Elektrotechniki, Warszawa 2008.
- [24] Šmak M., Kubiček J., Kala J., Podaný K., Vaněrek J.: *The influence of Hot-Dip Galvanizing on the Mechanical Properties of High-Strength Steels*. Materials 2021, 14(18): 5219.
- [25] Gunalan S., Mahendran M.: *Experimental investigation of post-fire mechanical properties of cold-formed steels*. Thin-Walled Structures 2014, 84: 241–254.
- [26] Azhari F., Heidarpour A., Zhao X.L., Hutchinson C.R.: *Mechanical properties of ultra-high strength (Grade 1200) steel tubes under cooling phase of a fire: An experimental investigation*. Construction and Building Materials 2015, 93: 841–850.
- [27] Unpublished company internal statistical analyses, 2021.

RICHARD KANDZIA, Ph.D., Eng.
r.kandzia@thiele.de
THIELE GmbH & Co.KG
Werkstr. 3, 58640 Iserlohn, Germany

MARIUSZ SZOT, Ph.D., Eng.
mszot@gig.eu
GIG Central Mining Institute
pl. Gwarków 1, 40-166 Katowice, Poland

RICHARD KANDZIA
MARIUSZ SZOT

Technologiczne aspekty rozwoju produkcji górniczych łańcuchów ogniowych

W artykule przedstawiono krótką historię rozwoju oraz typy aktualnie produkowanych łańcuchów górniczych, ich udział w rynku światowym. Określono kierunki rozwoju łańcuchów ogniowych górniczych w zakresie stosowanych materiałów i parametrów wytrzymałościowych. Wykazano negatywny wpływ niektórych czynników, które obniżają własności użytkowe łańcuchów ogniowych górniczych.

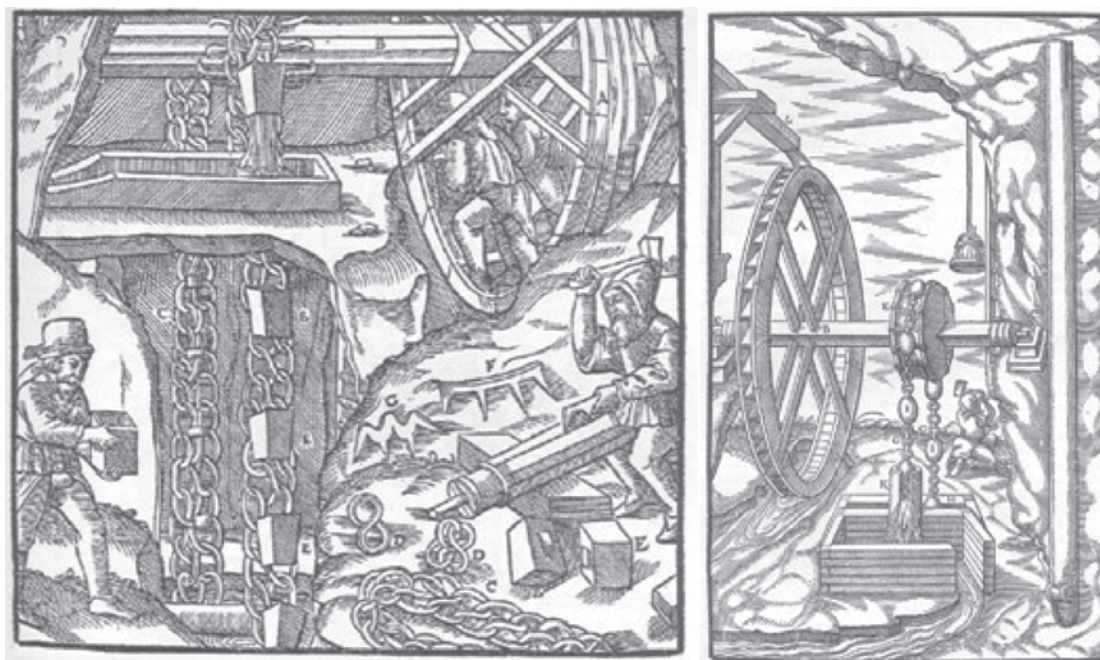
Słowa kluczowe: łańcuch, bezpieczeństwo, trwałość

1. WPROWADZENIE

Pierwsze przykłady zastosowania łańcuchów ogniowych w górnictwie znane są z obszernej pracy opublikowanej w roku 1556 przez Georgiusa Agricolę pod tytułem *De Re Metallica Libri XII*. W księdze szóstej zamieszczone są liczne ilustracje (rys. 1), na których widoczne są łańcuchy ogniowe wykorzystywane głównie w pionowych przenośnikach kubelko-

wych służących do wypompowania wody z podziemi kopalń [1, 2].

Łańcuchy ogniowe zastąpiły wcześniej rozpowszechnione liny konopne, które w wilgotnych wyrobiskach szybowych szybko butwiały, tracąc swą nośność. Stosowanie łańcuchów miało jednak inną wadę: uszkodzenie pojedynczego ogniwa często powodowało zerwanie łańcucha. Opadające łańcuchy niszczyły konstrukcję i obudowę przedziałów szybowych [3], co ostatecznie w XIX wieku doprowadziło do wynalezienia lin stalowych.



Rys. 1. Czerpadło łańcuchowe ciągnowe oraz łańcuchowy przenośnik rurowy [2]

Renesans stosowania łańcuchów ogniowych w górnictwie nastąpił dopiero po wprowadzeniu elektrycznego zgrzewania ogni, co znacznie obniżyło ich koszt produkcji i podniosło jakość zgrzein, oraz wraz z mechanizacją procesów wydobywczych, a w szczególności po wprowadzeniu technologii ścianowej przy eksploatacji pokładów węgla kamiennego.

2. ROZWÓJ ŁAŃCUCHÓW GÓRNICZYCH

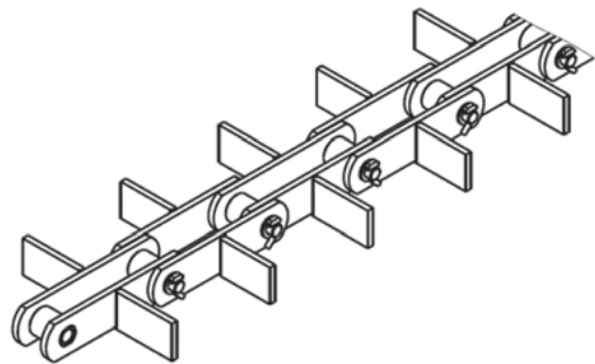
Mechanizacja transportu urobku w górnictwie węgla kamiennego rozpoczęła się w latach 20. XX wieku za pomocą przenośników wibracyjnych, tzw. rynien wstrząsanych. Pierwszy przenośnik wykorzystujący łańcuch ogniowy wprowadzono do eksploatacji w 1932 roku. Był to hamujący przenośnik tarczowy, stosowany na upadach powyżej 18° (rys. 2). Zadaniem tarcz zamontowanych na łańcuchu było wyhamowanie urobku staczającego się w otwartych rynnach. Przenośniki wibracyjne i przenośniki tarczowe zostały pod ziemią stopniowo wyparte przez przenośniki zgrzeblowe [4, 5].



Rys. 2. Hamujący przenośnik tarczowy [4, 5, 8]

Pierwsze przenośniki zgrzeblowe były wyposażone w łańcuchy drabinkowe (galla) schematycznie pokazane na rysunku 3 [6]. Taki typ łańcucha utrudniał przekładkę przenośnika, ponieważ umożliwiał przeginięcie trasy rynnościagu tylko w płaszczyźnie pionowej, dlatego w późniejszych konstrukcjach przenośników

zastosowano łańcuchy ogniowe w postaci ciągów z podwójnymi łańcuchami skrajnymi [7]. Początkowo były to łańcuchy zapożyczone z przemysłu okrętowego, np. $16 \text{ mm} \times 64 \text{ mm}$, tzn. o podziałce równej czterokrotności jego średnicy $t = 4 \cdot d$. W celu zwiększenia niezawodności przenośników zwiększono średnicę łańcuchów do 18 mm, zachowując jednocześnie podziałkę 64 mm. Zachowanie podziałki łańcucha wiązało się z zachowaniem średnicy podziałowej gwiazdy napędowej, co nie wymagało zmiany konstrukcji napędów. Natomiast średnica ogni 18 mm była wtedy największą średnicą, którą można było zgrzewać przy zastosowaniu metody zgrzewania oporowego. Dopiero wprowadzenie zgrzewania wyiskrzeniowego w 1952 roku [6] pozwoliło na elektryczne zgrzewanie łańcuchów o większych średnicach. Pierwszy ścianowy przenośnik zgrzeblowy wyposażony w łańcuch ogniowy został wypróbowany w kopalni „Bobrek” na Górnym Śląsku (wówczas „Gräfin-Johanna-Grube”) w roku 1941 [8, 9].



Rys. 3. Schematyczny przykład łańcucha drabinkowego (galla) [6]

Po drugiej wojnie światowej wzrosło zapotrzebowanie na węgiel kamienny, a w ślad za tym rozpoczęła się era mechanizacji górnictwa. W krótkim czasie zwiększyło się zapotrzebowanie na łańcuchy stosowane w przenośnikach zgrzeblowych, co doprowadziło do powstania pierwszej normy na tzw. łańcuchy górnicze – DIN 22252. Jej pierwsze wydanie z marca 1951 roku [10] uwzględniało jedynie łańcuchy $16 \text{ mm} \times 64 \text{ mm}$ i $18 \text{ mm} \times 64 \text{ mm}$.

Początkowo łańcuchy górnicze były produkowane w odcinkach po 15 ogni. Tolerancję długości regulowała norma (+4 mm / -1 mm). Technologicznie nie było możliwe produkowanie odcinków o dokładnie tej samej długości w powtarzalnych seriach, dlatego odcinki 15-ogniowe były mierzone i sortowane według odchyłki długości, a następnie wiązane w pary. Wiązanie odcinków o tej samej odchyłce długości w pary wynikało ze sposobu pracy ciągów łańcuchowych w tzw. trasach z łańcuchami skrajnymi. Typowy

odcinek trasy łańcuchowej składa się z dwóch odcinków łańcucha ogniowego, dwóch zamków bocznych oraz jednego zgrzebła (rys. 4). W zależności od potrzeb takie odcinki łączyło się w sekcje o typowej długości, np. około 10 m, co zazwyczaj zależało od możliwości logistycznych użytkownika.

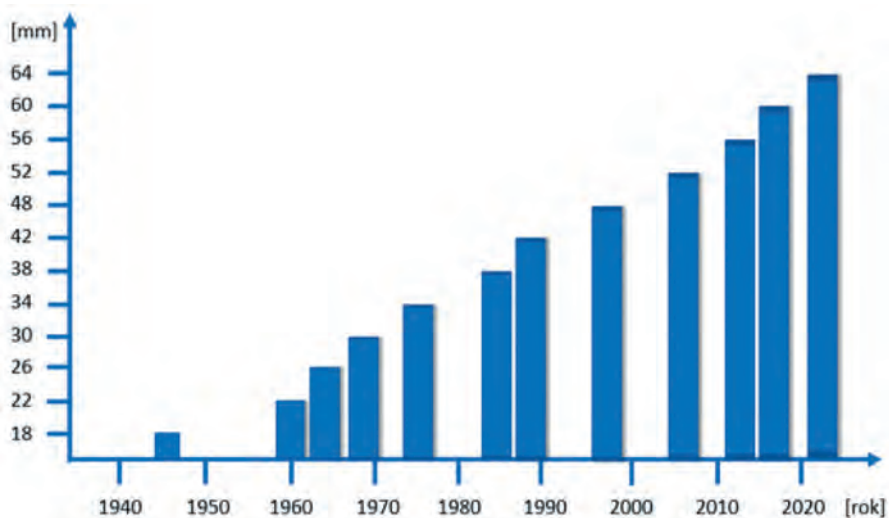


Rys. 4. Trasa łańcuchowa z zewnętrznym prowadzeniem łańcuchów [11]

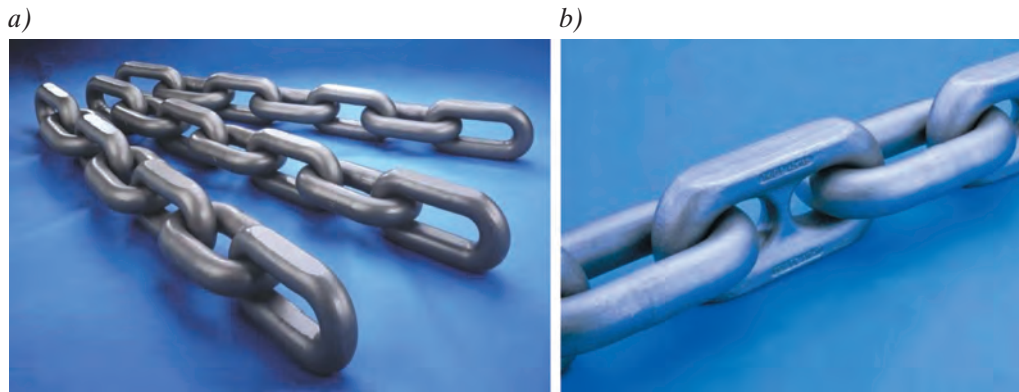
Rozwój łańcuchów górniczych wynikał ze wzrostu intensywności wydobywania i związanej z tym wydajności górniczych przenośników zgrzeblowych. Aby podnieść parametry użytkowe, zwiększano stopniowo średnice łańcuchów ($\varnothing 20$ mm, 22 mm, 24 mm, 26 mm i 30 mm) oraz stosowano coraz to lepsze gatunki stali [2]. Czwarte wydanie normy DIN 22252 z grudnia 1973 roku [12] wymienia znane jeszcze obecnie łańcuchy, np. 22 mm \times 86 mm, 24 mm \times 87,5 mm, 26 mm \times 92 mm i 30 mm \times 108 mm. Łańcuch 30 mm \times 108 mm był w tym czasie największym łańcuchem górniczym i pierwszym, który zaczęto produkować w długich odcinkach i stosować jako łańcuch centralny. Początkowo stosowano łańcuch 30 mm \times 108 mm jako pojedynczy łańcuch centralny, a po udoskonaleniu procesu kalibracji

i parowania również jako podwójny łańcuch centralny [13]. Norma [12] wprowadza tolerancję różnicy długości dla odcinków o długości do 25 m. Dla pary łańcuchów dopuszcza się różnicę długości obu odcinków do 8 mm. Polska Norma PN-G-46701:1997. *Łańcuchy ogniowe górnicze* [14] dla łańcuchów długich dopuszcza różnicę długości pod obciążeniem próbnym nie większą niż 0,15% sumy podziałek ogniw. Na rysunku 5 pokazana jest historia rozwoju średnic nominalnych łańcuchów górniczych wykonywanych z prętów okrągłych.

Pierwszy łańcuch płaski został wprowadzony na rynek w roku 1985 [9]. Był to łańcuch o średnicy nominalnej pręta 38 mm. Wszystkie kolejne łańcuchy o większych średnicach nominalnych były łańcuchami płaskimi (rys. 6), superpłaskimi lub łańcuchami o konstrukcjach specjalnych [15]. Wyjątek w tym szeregu stanowi łańcuch strugowy 42 mm \times 137 mm, który pojawił się w formie zwykłego łańcucha ogniowego w roku 2006. Wśród łańcuchów specjalnych wyróżniają się łańcuchy kompaktowe wprowadzone do produkcji w latach 80. XX wieku, w których średnica nominalna odnosi się do ogniwa poziomego, natomiast średnica ogniw pionowych jest zróżnicowana na obwodzie, a na łukach zazwyczaj większa niż średnica ogniwa poziomego. Szczególnym przypadkiem konstrukcyjnym są łańcuchy potrójnie niskie, w których średnica nominalna odnosi się zazwyczaj do teoretycznego przekroju obliczeniowego. Daty podane na rysunku 5 są tylko orientacyjne, ponieważ trudno jednoznacznie ustalić, co należy uznać za datę wprowadzenia nowego rozmiaru nominalnego łańcucha: czy datę opracowania konstrukcji, zgłoszenia patentowego, ustalenia technologii produkcji, pierwszego wdrożenia pod ziemią, czy wpisania do normy.



Rys. 5. Historia rozwoju średnic nominalnych łańcuchów górniczych



Rys. 6. Łańcuchy: a) płaskie; b) superpłaskie

3. WPŁYW WŁASNOŚCI MATERIAŁOWYCH NA TECHNOLOGIĘ PRODUKCJI ŁAŃCUCHÓW

Łańcuchy wykorzystywane w maszynach górniczych w początkach mechanizacji były jeszcze często zgrzewane ogniskowo, tzn. rozgrzewane na palenisku koksowym lub w piecu, a następnie kute ręcznie za pomocą młota. Zgrzeina znajdowała się na łuku, co wynikało z faktu, iż zgrzewano zaostrzone i nachodzące na siebie końcówki pręta. Tak wykonywane zgrzeiny nie odpowiadały rosnącym wymaganiom technicznym użytkowników. Zastosowanie zgrzewania oporowego pozwoliło na poprawę jakości zgrzeiny, ale jego stosowanie było ograniczone do ogniw o średnicy pręta 18 mm [6]. Jednak również w tak produkowanych łańcuchach górniczych słaba jakość zgrzeiny była jedną z głównych przyczyn zrywania łańcuchów. Dopiero wprowadzenie zgrzewania wyiskrzeniowego do produkcji łańcuchów w roku 1952 pozwoliło na zdecydowaną poprawę jakości zgrzein. Technologia zgrzewania wyiskrzeniowego umożliwiła rozwój łańcuchów o średnicach nominalnych powyżej 18 mm. Od 1940 roku następuje ciągły rozwój w zakresie produkcji łańcuchów. Potrzeba rynku spowodowała uruchomienie produkcji łańcuchów o zwiększonych średnicach i łańcuchów o podwyższonych własnościach kolejno >900 MPa, 1000 MPa, 1050 MPa, 1100 MPa, które charakteryzują się znacznie wyższymi parametrami użytkowymi w porównaniu z łańcuchami we-

dług PN, DIN. Stosowane nowe materiały i technologia obróbki cieplnej pozwoliły na osiągnięcie optymalnego i powtarzalnego rozkładu twardości w każdym ogniwie, jak również uzyskać zmienną twardość w pojedynczym ogniwie, czyli twarde łuki i uplastycznione odcinki proste o niższej twardości. Odpowiednio w kolejnych latach zmieniano rodzaj stosowanego materiału oraz rodzaj obróbki – dane zestawiono w tabeli 1.

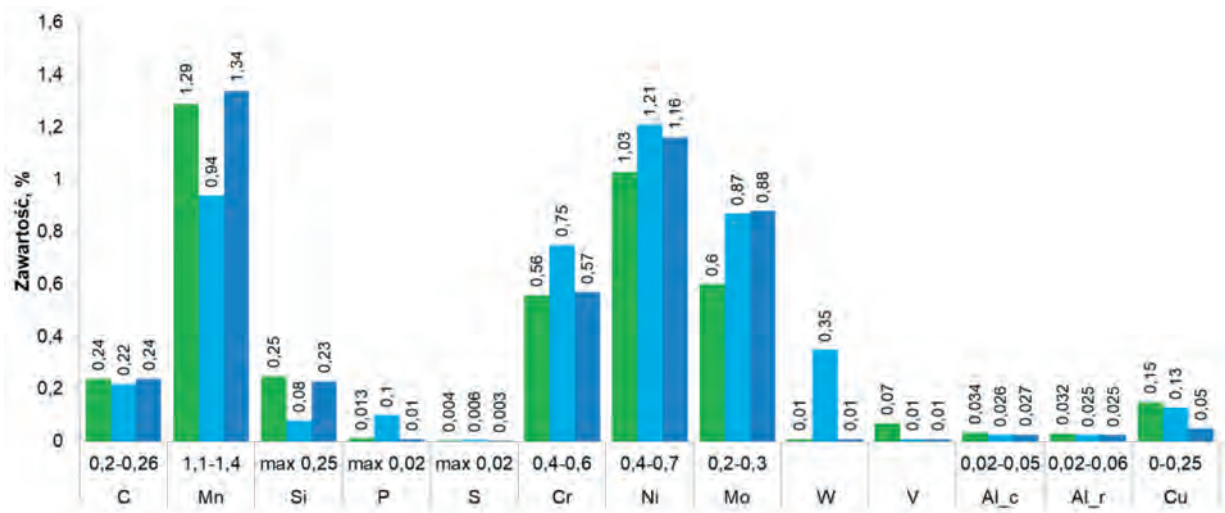
Obecnie najpopularniejszym gatunkiem stali wykorzystywanym do produkcji łańcuchów górniczych jest 1.6758 według niemieckiego klucza stali, czyli 23MnNiMoCr54, którego polski odpowiednik nosi nazwę 23G2NMHA. Dla łańcuchów o średnicach ogniw do 26 mm wykorzystuje się często stal niższego gatunku, 23MnNiMoCr52, numer 1.6541, której polski odpowiednik nosi nazwę 23GNMHA. Obecnie do produkcji łańcuchów stosowany jest gatunek stali o numerze 1.6758, z pewnymi modyfikacjami dotyczącymi składu chemicznego.

Skład chemiczny najpopularniejszego gatunku stali wykorzystywanego do produkcji łańcuchów górniczych podaje norma [16]. Norma polska [14] nie narzuca producentom łańcuchów określonego gatunku stali. Producenci łańcuchów, aby spełnić wymagania zamawiających w zakresie wytrzymałości łańcuchów, trwałości zmęczeniowej, odpowiedniego zabezpieczenia korozyjnego stosują ulepszone wersje stali. W pracy [17] przedstawiono przykładowe składy chemiczne łańcucha strugowego 42 mm × 137 mm trzech różnych producentów (rys. 7).

Tabela 1

Rodzaj materiału i obróbki cieplnej

1945	1950	1968	1974	1985	1990	1997
St-35.13K	15Mn3	20MnCr4	23MnNiCrMo64	23MnNiCrMo54	23MnNiCrMo54	23MnNiCrMo54
Naturalne hartowanie	Hartowanie	Hartowanie z odpuszczaniem	Hartowanie z odpuszczaniem	Hartowanie z odpuszczaniem	Hartowanie podwójne >Ac3	Hartowanie podwójne >Ac3



Rys. 7. Przykładowy skład chemiczny stali

Poszczególni producenci łańcuchów górnich starają się wprowadzić na rynek gatunki stali, które dodatkowo wzbogacane są mikrododatkami innych metali, np. wolframu, wanadu, boru i innych. Celem tych praktyk jest uzyskanie po obróbce termicznej takich parametrów stali, które poprawią własności mechaniczne łańcuchów górnich, a w szczególności osiągnięcie wyższej udarności.

3.1. WPŁYW WŁASNOŚCI MATERIAŁOWYCH NA ZGRZEWALNOŚĆ STALI

Wraz z rozwojem technologii zgrzewania nastąpił rozwój stali, z których wykonywano łańcuchy górnicze. Początkowo były to stale węglowe (niestopowe), następnie stale z dodatkiem manganu, a dopiero pod koniec lat sześćdziesiątych XX wieku do produkcji łańcuchów zaczęto stosować stale niskostopowe z dodatkiem manganu, niklu, molibdenu i chromu. W roku 1965 została wydana pierwsza norma opisująca stale niskostopowe do produkcji łańcuchów górnich. Była to norma niemiecka DIN 17115 [18]. Jej polskim odpowiednikiem jest norma PN-89/H-84023/08 [19].

Istotnym parametrem pozwalającym ocenić przydatność danego gatunku stali do produkcji łańcuchów górnich jest tzw. równoważnik węgla C_e . Jest to parametr stosowany w spawalnictwie mówiący o spawalności stali węglowych i niskostopowych w zależności od składu chemicznego stali. Charakteryzuje on skłonność materiału do występowania pęknięć spawalniczych. Równoważnik węgla wyznacza się ze wzoru (1) [11]:

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + V + Mo}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \% \quad (1)$$

Im niższa wartość C_e , tym lepsza spawalność materiału. Zakłada się, że równoważnik węgla ocenia zdolność materiału również do zgrzewania wyiskrzeniowego. Wartości krytyczne równoważnika węgla dla zgrzewania odbiegają od wartości uznanych dla spawania i są wyznaczane doświadczalnie, co związane jest z temperaturą podgrzania i średnicą zgrzewanych prętów. Przyjmuje się, że zgrzewanie wyiskrzeniowe można przeprowadzić bez ryzyka pęknięć do wartości $C_e = 0,8$, natomiast wartością graniczną równoważnika węgla dla zgrzewania jest $C_e < 0,9$ [11]. Duży wpływ na jakość zgrzeiny i zdolność materiału do zgrzewania mają również zanieczyszczenia, a w szczególności zawartość siarki i fosforu. Ich łączna ilość nie powinna przekraczać 0,035%. Niepożądane jako składniki stopowe są również aluminium i miedź.

3.2. Wpływ własności materiałowych na cynkowanie łańcuchów

Rozwiązaniem problemu korozji miało okazać się wprowadzenie cynkowania ogniowego łańcuchów górnich, nazywanego również cynkowaniem zanurzeniowym, ponieważ nanoszenie cynku na ogniwa łańcucha odbywa się podczas kilkuminutowej kąpieli w ciekłym cynku, w temperaturze około 440–460°C. Podczas tej kąpieli dochodzi do dyfuzji atomów cynku w strukturę krystaliczną stali [20], wypełnienia powierzchniowych nierówności i porów cynkiem, w wyniku czego tworzy się warstwa bardzo ściśle przylegająca do powierzchni ogniwa łańcucha określana jako stop stal-cynk (żelazo-cynk) o wysokości około 80–120 μm. Powłoka ta charakteryzuje się dużą przyczepnością do podłoża oraz stosunkowo dużą odpornością na ścieranie.

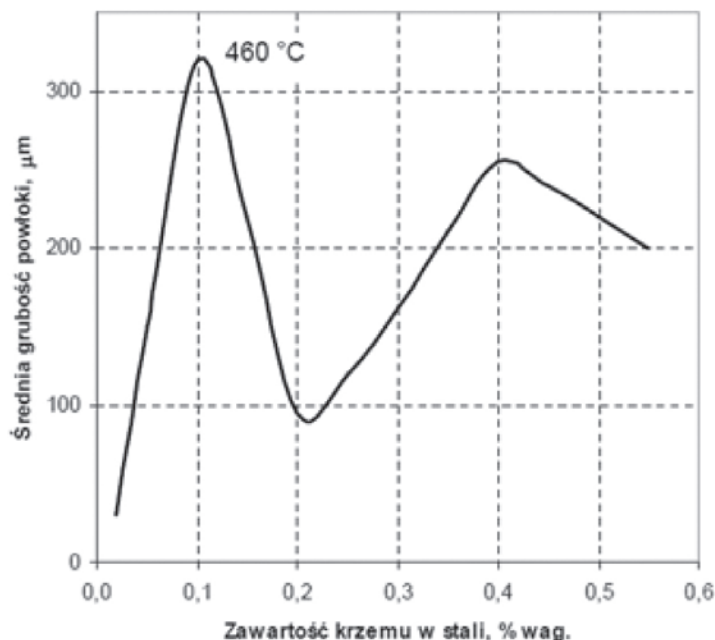
Jakość uzyskiwanych powłok cynkowych (połysk, gładkość, grubość, przyczepność itp.) jest różna i zależy od składu chemicznego stali w szczególności od zawartości węgla (C), fosforu (P) i krzemu (Si). Zawartość węgla i krzemu w stali nie powinna przekraczać łącznie 0,5%. Dla stali zawierających węgiel w postaci martenzytu wzrost zawartości węgla w przedziale 0,01–2,08% mas. systematycznie zwiększa reaktywność stali względem ciekłego cynku, nie rozszerzając zakresu liniowego przebiegu reakcji. Zdarza się, że w stalach zawierających krzem reakcja żelazo-cynk przebiegnie szczególnie intensywnie i udział stopu żelazowo-cynkowego w powłoce będzie wyższy niż normalnie. W skrajnym przypadku powłoka cynkowa może składać się całkowicie ze stopu żelazowo-cynkowego. Zjawisko to (tzw. efekt Sandelina) obserwuje się zwłaszcza przy zawartości krzemu od

0,03% do 0,14%, jak również powyżej 0,25%. W tych przypadkach powłoka cynkowa jest najczęściej matowoszara, chropowata, nierównomierna, krucha – wrażliwa na odkształcenia i uszkodzenia mechaniczne. Wpływ zawartego w stali krzemu na jej rozpuszczalność w ciekłym cynku przedstawia rysunek 8 [21]. Stosowany w metalurgii stali krzem powoduje znaczny wzrost jej reaktywności z ciekłym cynkiem i jest szczególnie wysoki przy dwóch stężeniach tego pierwiastka wynoszących około 0,1% i około 0,4% mas.

Właściwości powłoki cynkowej powiązane ze składem chemicznym stali określa norma [22]. Dlatego mając na uwadze zawartość krzemu i węgla w stali łańcuchowej, możemy określić kryteria przydatności stali do cynkowania ogniowego:

$$C + Si < 0,5\% \quad (2)$$

$$0,1 < Si < 0,25\% \quad (3)$$

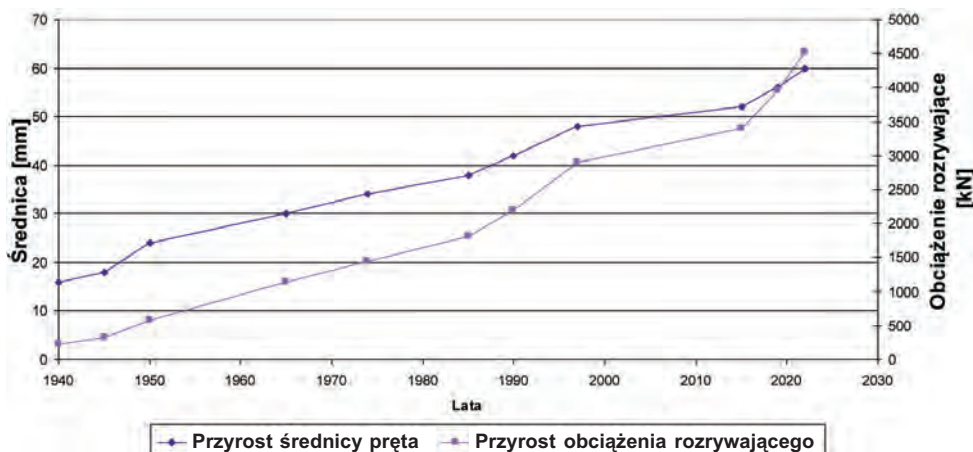


Rys. 8. Wpływ krzemu na grubość powłoki

3.3. Wpływ technologii wykonania ogniów na parametry wytrzymałościowe łańcuchów

Od wielu lat kierunkiem rozwoju w dziedzinie przenośników zgrzeblowych jest stosowanie łańcuchów wykonanych z grubszych prętów, lepszych materiałów i zastosowanej lepszej obróbki plastycznej. Doświadczenia z kopalń krajów zachodnioeuropejskich o rozwiniętym górnictwie węglowym wykazywały początkowo słuszność tego kierunku rozwojowego. Przykładowo [23] w 1983 roku we Francji wykazano, że prawidłowo wykonanym i dobranym ciągnem łańcu-

chowym 26 mm × 92 mm można w trudnych warunkach górniczo-geologicznych bezawaryjnie przetransportować 0,6–0,8 Mt węgla, zaś ciągnem łańcuchowym 34 mm × 126 mm aż 2,4 Mt urobku. Ten kierunek rozwojowy doprowadził do wyprodukowania przenośników z ciągnami o łańcuchach 60 mm × 189/136 mm, dla których należy się spodziewać jeszcze lepszych rezultatów ilościowych. Na wykresie (rys. 9) zestawiono zmiany w średnicy i wartości obciążenia zrywającego od 1940 roku. I tak od roku 1940 od średnicy pręta 16 mm doszliśmy do średnicy 60 mm i obciążenia zrywającego 4760 kN.



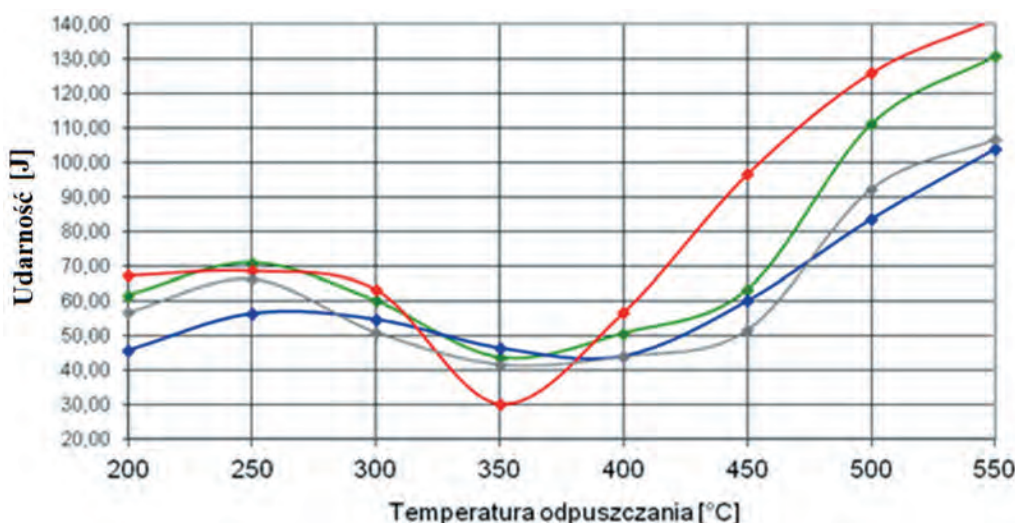
Rys. 9. Zmiany parametrów wytrzymałościowych i geometrycznych

3.3.1. Wpływ obróbki cieplnej na udarność

Wytrzymałość stali łańcuchowej, od której zależy klasa jakości łańcuchów górniczych, uzależniona jest od przeprowadzonej obróbki termicznej. Krokiem wielostopniowej obróbki decydującym o końcowych parametrach wytrzymałościowych jest odpuszczanie. W celu ustalenia zależności wielkości udarności od temperatury odpuszczania stali łańcuchowej przeprowadzono cykl badań porównawczych, w których porównano próbki

stali gatunku 1.6758 pochodzące od czterech dostawców: A, B, C i D. Na rysunku 10 naniesiono w formie wykresów wyniki wszystkich badań.

Na przykładzie dostawcy A jest najbardziej widoczne, że w zakresie temperatur około 350°C wyniki udarności osiągają lokalne minimum, co odpowiada temperaturom odpuszczania łańcuchów klasy D. Wysokie wartości udarności uzyskuje się przy temperaturach odpuszczania powyżej 450°C. W zakresie takich temperatur odpuszczane są łańcuchy klasy C.



Rys. 10. Wyniki badań udarności w zależności od temperatury odpuszczania próbek stali pochodzących od dostawców A, B, C i D

3.3.2. Wpływ procesu cynkowania na własności wytrzymałościowe

Badania doświadczalne opisane w [23] potwierdziły, że cynkowanie ogniowe obniża właściwości mechaniczne gatunków stali wysokowytrzymałych w wyniku dodatkowego odpuszczania struktury martenzytycznej. Kluczowymi zaletami stali wysokowytrzymałych są pla-

styczność i wytrzymałość na rozciąganie. Stale o dużej zawartości krzemu, chromu, molibdenu, manganu charakteryzują się dużą twardością połączoną z dużą wytrzymałością. Posiadają wysoką granicę plastyczności oraz wytrzymałość na rozciąganie. W przypadku tego rodzaju stali zmiana granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie wynikająca z cynkowania ogniowego będzie duża. W przypadku badań prowadzonych

w pracy [24] zanotowano spadek wytrzymałości na rozciąganie o 17%, a w przypadku wyników badań dla pracy [25] 14%. Wyniki opisane w opracowaniach badawczych potwierdzają, że stale wysokowytrzymałe nadają się do cynkowania ogniowego tylko wtedy, gdy stopień obniżenia właściwości wytrzymałościowych jest znany.

4. ANALIZA WIELKOŚCI I KONSTRUKCJI ŁAŃCUCHÓW GÓRNICZYCH STOSOWANYCH W ŚWIATOWYM PRZEMYSŁE WYDOBYWCZYM

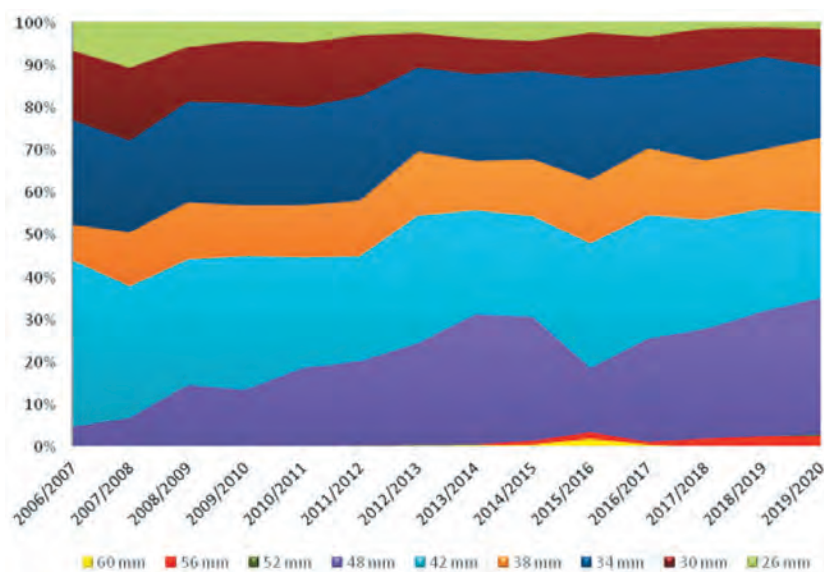
Generalny trend do stosowania coraz to większych średnic nominalnych łańcuchów górniczych potwierdza się na przykładzie ilości produkowanych przez jednego z wiodących producentów łańcuchów górniczych [26]. Ilości pokazane na rysunku 11 nie są reprezentatywne dla łącznej produkcji światowej, dają jednak wyobrażenie o tym, jaki w przybliżeniu jest udział procentowy poszczególnych rozmiarów. Analizując pojedyncze rynki górnicze, można zaobserwować okresy ilościowej dominacji poszczególnych rozmiarów. Na przykładzie rynku amerykańskiego można stwierdzić, że co mniej więcej 10 lat dochodzi do modernizacji parku maszynowego i przeskoku do kolejnego rozmiaru łańcuchów górniczych stosowanych w przenośnikach ścianowych. W latach 80. w USA najpopularniejsze były łańcuchy ogniowe 34 mm × 126 mm, które następnie wyparte zostały przez łańcuchy płaskie 38 mm × 126 mm. Po roku 2000 najczęściej

stosowane były łańcuchy płaskie 42 mm × 146 mm, natomiast po roku 2010 rynek został zdominowany przez łańcuchy o średnicy ogniów 48 mm. Aktualnie autorom znane są projekty modernizacji istniejących instalacji uwzględniające łańcuchy o średnicy nominalnej 52 mm.

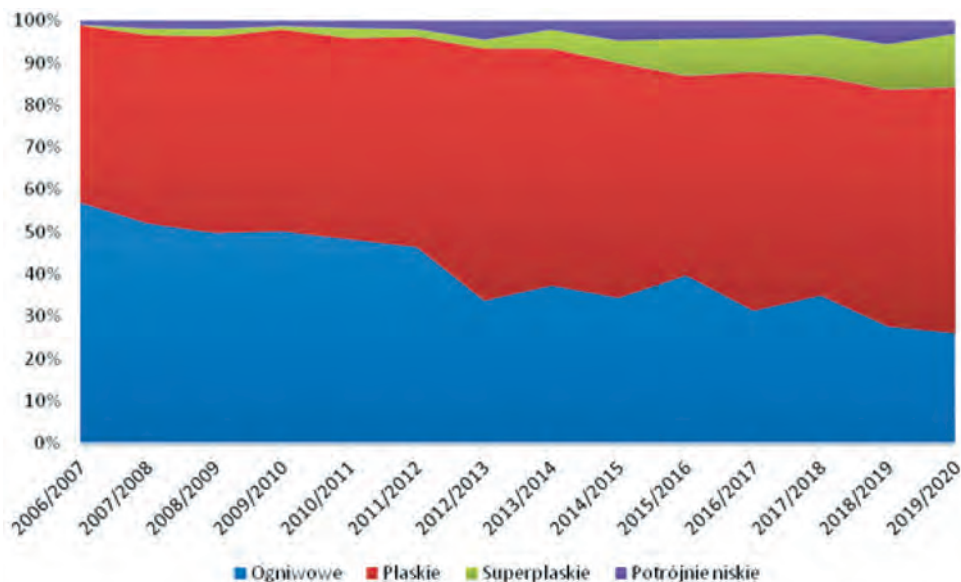
Intensyfikacja produkcji w przodkach ścianowych w połączeniu z coraz większymi rozmiarami łańcuchów przenośnikowych skutkuje zwiększeniem żywotności łańcuchów mierzonej w tonach odstawionego urobku i dochodzi do 10–12 milionów ton urobku brutto w przypadku łańcuchów o średnicy nominalnej 48 mm.

Żywotność łańcuchów górniczych z uwagi na okres eksploatacji ograniczona jest przede wszystkim warunkami eksploatacji, tzn. intensywnością wydobywania, ilością skały płonnej, warunkami górniczymi, a w szczególności ewentualnym występowaniem korozji i wynosi niezależnie od rozmiaru i typu łańcucha 12–24 miesięcy.

Jednocześnie można zaobserwować trend do stosowania coraz to niższych łańcuchów, co spowodowane jest dopasowaniem ich konstrukcji do ograniczonych gabarytów przenośników zgrzeblowych przy jednoczesnym wzroście zainstalowanych mocy silników elektrycznych. Widoczny na rysunku 12 stosunkowo niewielki udział łańcuchów potrójnie niskich wynika z wysokich kosztów ich produkcji oraz obostrzeń patentowych ograniczających możliwości ich rozpowszechnienia. Udział procentowy poszczególnych typów i rozmiarów łańcuchów górniczych na wyodrębnionych rynkach zależy od stopnia intensywności wydobywania, zaawansowania techniki górniczej oraz możliwości finansowych działających tam producentów węgla.



Rys. 11. Udział procentowy poszczególnych rozmiarów łańcuchów górniczych [27]



Rys. 12. Udział procentowy poszczególnych konstrukcji łańcuchów górniczych na przykładzie produkcji jednego z producentów łańcuchów górniczych [27]

5. WNIOSKI

Niniejszy artykuł jest podsumowaniem wyników badań laboratoryjnych oraz prowadzonej kwerendy literatury. Pierwsze łańcuchy ogniowe stosowane w maszynach górniczych miały średnicę 16 mm. Najmniejsze łańcuchy stosowane w przenośnikach górniczych to 14 mm × 50 mm, natomiast największe łańcuchy używane obecnie w przenośnikach górniczych mają średnicę nominalną 60 mm. Prowadzone są już prace rozwojowe nad łańcuchami kolejnych generacji o średnicach nominalnych 64 mm i 68 mm. Trend do powiększania średnicy łańcuchów utrzymał się przez ostatnich prawie 80 lat historii maszyn górniczych, choć już kilkakrotnie wydawało się, że osiągnięto granicę możliwości technicznych w ich produkcji. Wydawało się, że nie będzie potrzeby stosowania coraz to większych średnic z powodu instalowania w przenośnikach zgrzeblowych czy strugach węglowych coraz to większych mocy napędów celem zwiększenia ich wydajności. Przedstawiony materiał wskazuje, że nie możemy bezkrytycznie stosować dowolnego materiału oraz rodzaju obróbki cieplnej w produkcji łańcuchów. Istotny wpływ na rozwój produkcji łańcuchów miało opracowanie nowych gatunków stali wysokowytrzymałych. Poza zwiększaniem nośności łańcuchów górniczych w wyniku zwiększania średnicy ogniw prace konstruktorów i technologów koncentrowały się na następujących celach:

- zwiększaniu wytrzymałości łańcuchów w wyniku stosowania nowych gatunków stali,
- ujednorodnieniu parametrów mechanicznych w wyniku precyzyjnej obróbki termicznej,
- obniżaniu wysokości ogniw pionowych w łańcuchach kombinowanych umożliwiających redukcję wysokości przenośników zgrzeblowych,
- wydłużaniu żywotności łańcuchów przez projektowanie ogniw o kształtach umożliwiających wolniejsze wydłużanie podziałki łańcucha,
- uzyskaniu powtarzalności kształtu ogniw, a w szczególności ich podziałki.

Aktualnym trendem rozwojowym jest opracowanie łańcuchów wyposażonych w czujniki pomiaru obciążenia umożliwiające stałe jego monitorowanie, kontrolę wstępnego napięcia łańcucha oraz jego zabezpieczenie przed przeciążeniami w wyniku nadmiernego załadunku lub blokad przenośnika. Prace w tym kierunku są prowadzone przez kilka ośrodków badawczo-rozwojowych skupionych wokół producentów przenośników zgrzeblowych oraz producentów łańcuchów. Zintegrowanie czujników pomiaru siły w poruszającym się łańcuchu przenośnikowym jest wyzwaniem technicznym trudnym do realizacji z powodu barier technologicznych dotyczących zarówno miniaturyzacji systemu pomiarowego, jak i zasilania w energię elektryczną oraz możliwości transformacji danych pomiarowych.

Produkcja węgla kamiennego metodą ścianową w następnych dwóch dekadach będzie również stanowiła dużą część produkcji światowej tego surowca. Z uwagi na wzrost wydajności, potrzebę monitorowania produkcji – w celu zwiększenia bezpieczeństwa

eksploatacji – należy się liczyć z dalszym rozwojem konstrukcji i rozmiarów łańcuchów górniczych oraz w skali światowej z utrzymaniem dotychczasowego zapotrzebowania na ich produkcję.

Literatura

- [1] Agricola G.: *De Re Metallica Libri XII*. Bazylea 1556; *Zwölf Bücher vom Berg- und Hüttenwesen gehören...* Sechstes Buch. Schiffner C., Darmstaedter E. (übersetzt und bearb.). VDI-Verlag, Düsseldorf 1978.
- [2] Philipp G.B., Thiele U., Cooper J.R.: *Eine neue Flachkette mit präzisen Kettenrädern für Hochleistungsstreben*. Glückauf 1993, 9: 682–688.
- [3] Philipp G.B.: *Grenzen der Technik – Lebensdauer von Bauteilen – August Wöhlers Schaffen und seine Verdienste*. Bergbau 2008, 5: 224–229.
- [4] Paschedag U.: *Face conveyor systems*. W: Junker M., Lemke M., Heiderich R.-M., Langefeld O., Mozar A., Paschedag U., Philipp G., Witthaus H.: *Technical developments in coal winning*. Vulkan-Verlag GmbH, Essen 2018: 181–224.
- [5] Paschedag U.: *Entwicklungen in der Strebördertechnik in den letzten 50 Jahren*. Bergbau 2018, 4: 175–182.
- [6] Philipp G.B.: *Die Rundstahlkette als Element der Leistungsübertragung bei Förderern im Strebbau*. RWTH, Aachen 1999 [rozprawa doktorska].
- [7] Spies K.: *Leistungsübertragung mit Rundstahlketten*. Glückauf 1993, 6: 411–415.
- [8] Dreher H.: *Górnictwo nie jest sprawą jednego*. XI Międzynarodowa Konferencja Techniki Urabiania „TUR 2019”, Krynica-Zdrój, 17–20 września 2019 r. [artykuł konferencyjny].
- [9] Philipp G.B.: *Conveyor chains, plow chains and flight bars*. W: Junker M., Lemke M., Heiderich R.-M., Langefeld O., Mozar A., Paschedag U., Philipp G., Witthaus H.: *Technical developments in coal winning*. Vulkan-Verlag GmbH, Essen 2018: 225–247.
- [10] DIN 22252, März 1951. *Rundgliederketten*.
- [11] Forch K.: *Werkstoffkundliches Seminar*. Iserlohn, 17.02.2001.
- [12] DIN 22252, Dezember 1973. *Hochfeste Rundstahlketten für den Bergbau*.
- [13] Philipp G.B.: *Chain Matching – The key for high-extraction-rate longwalls*. Glückauf 1998, 2: 24–27.
- [14] Polska Norma PN-G-46701:1997. *Łańcuchy ogniwowe górnicze*.
- [15] Kandzia R.: *Kompendium wiedzy o ogniowych łańcuchach górniczych*. Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze 2018, 1(39): 69–76.
- [16] DIN 22252, Juli 2012. *Rundstahlketten für Stetigförderer und Gewinnungsanlagen im Bergbau*.
- [17] Kandzia R., Szot M.: *Fatigue Life Testing of the Round Link Mining Chains*. Management Systems in Production Engineering 2023, 31(1): 78–85.
- [18] DIN 17115, Juli 2021, *Stähle für geschweißte Rundstahlketten und Ketten-Einzelteile – Technische Lieferbedingungen*.
- [19] Polska Norma PN-H-84023-08:1989. *Stal określonego zastosowania – Stal na łańcuchy ogniwowe – Gatunki*.
- [20] American Galvanizers Association: *Hot-Dip Galvanizing – Abrasion Resistance*. <https://galvanizeit.org/hot-dip-galvanizing/why-specify-galvanizing/durability> [4.06.2021].
- [21] Głuszko M.: *Zagadnienia ochrony antykorozyjnej konstrukcji stalowych oraz urządzeń elektroenergetycznych eksploatowanych w warunkach atmosferycznych*. Prace Instytutu Elektrotechniki, z. 235, Instytut Elektrotechniki, Warszawa 2008.
- [22] Polska Norma PN-EN ISO 14713-2:2020-07. *Powłoki cynkowe – Wytyczne i zalecenia dotyczące ochrony przed korozją konstrukcji z żeliwa i stali – Część 2: Cynkowanie zanurzeniowe*.
- [23] Schriever K.: *Neue Antriebsysteme für den Bergbau unter Tage*. Glückauf 1979, 10.
- [24] Šmak M., Kubiček J., Kala J., Podaný K., Vaněrek J.: *The influence of Hot-Dip Galvanizing on the Mechanical Properties of High-Strength Steels*. Materials 2021, 14(18): 5219.
- [25] Gunalan S., Mahendran M.: *Experimental investigation of post-fire mechanical properties of cold-formed steels*. Thin-Walled Structures 2014, 84: 241–254.
- [26] Azhari F., Heidarpour A., Zhao X.L., Hutchinson C.R.: *Mechanical properties of ultra-high strength (Grade 1200) steel tubes under cooling phase of a fire: An experimental investigation*. Construction and Building Materials 2015, 93: 841–850.
- [27] Niepublikowane wyniki wewnętrznej analizy statystycznej firmy THIELE, 2021.

dr inż. RICHARD KANDZIA
r.kandzia@thiele.de
THIELE GmbH & Co.KG
Werkstr. 3, 58640 Iserlohn, Niemcy

dr inż. MARIUSZ SZOT
mszot@gig.eu
GIG Central Mining Institute
pl. Gwarków 1, 40-166 Katowice