Jerzy Piaskowski

LE DÉVELOPPEMENT DE LA TECHNOLOGIE D'ACIER ET DU FER EN POLOGNE D'APRÈS LES EXAMINATIONS MÉTALLOGRAPHIQUES DES PRODUITS ANCIENS

Les différents domaines de la science tels que l'antropologie, la zoologie et la botanique ont été largement appliqués dans les recherches archéologiques sur le passé de la société humaine. Par contre, la métallographie n'a pas joué jusqu'ici un rôle considérable dans ces travaux malgré que les méthodes métallographiques soient appliquées depuis longtemps dans les examinations des objets archéologiques — on peut y citer par exemple les travaux [1] qu'ont réalisés H. Bell [2], H. Hadfield [3], H. O. Carpenter et J. M. Robertson [4], H. Hanemann [5], O. Krasa [6], J. W. Gilles [7] et d'autres.

Après la dernière guerre on peut observer un accroissement d'intérêt bien considérable pour l'histoire de la technique. On publie les résultats de nouvelles importantes recherches qu'ont menés entre autres E. Salin [8], A. France Lenord [9], C. J. Livadefs [10], R. Plei-

---

[1] Puisque le travail présent traite des examinations des anciens produits de fer on n'a cité par conséquent que des publications concernant ce genre des produits.

[2] H. Bell, *Notes on a bloom of roman iron found at Corstopitum (Corbridge)*, „Journal of the Iron and Steel Institute", 1912, t. 85, no 1, p. 118.

[3] H. Hadfield, *Sinhalese iron and steel of ancient origin*, „Journal of the Iron and Steel Institute", 1912, t. 85, no 1, p. 134

[4] H. C. H. Carpenter et J. M. Robertson, *The metallography of some ancient Egyptian implements*, „Journal of the Iron and Steel Institute", 1930, t. 121, p. 417

[5] H. Hannemann, *Untersuchung von Roststahl aus der vorrömischen Zeit*, „Stahl und Eisen", 1931, t. 51, p. 67.

[6] O. Krasa, *Vorgeschichtliche Eisenschmelzen in Siegerland*, „Stahl und Eisen", 1931, t. 52, p. 1287.

[7] J. W. Gilles, *Vorgeschichtliche Eisenhüttenplätze des Siegerlandes*, „Stahl und Eisen", 1936, t. 56, p. 252.

[8] E. Salin, *Sur les techniques de la métallurgie du fer de la préhistoire au temps de grandes invasions*; „Revue de métallurgie", 1952, no 3, p. 165.

[9] A. France-Lenord, *Les techniques métallurgiques appliqués à l'archéologie*, „Revue de Métallurgie", 1952, no 6, p. 411

ner, F. Plzak et O. Quadrat [11], C. Panseri, C. Carino et M. Leoni [12] et en Pologne A. Krupkowski et T. Reyman [13], A. Zbierski [14].

Les dites recherches ne concernaient que quelques objets et en général elles n'épuisaient pas toutes les possibilités de la métallographie moderne. Dans ces conditions on serait obligé d'attendre encore longtemps avant de pouvoir acquérir les connaissances au sujet du développement de la technologie des produits de fer dans les temps anciens. Ce n'est que B. A. Kołczin [15] qui applique le premier les examinations sur un grand nombre des anciens produits de fer.

A la base des examinations de 286 objets de fer provenant de 32 endroits différents, cet auteur avait étudié la technologie de fer sur les territoires de la Ruthénie à partir du X-ème siècle jusqu'au XII-ème siècle. Les recherches de B. A. Kołczin comprenaient les observations métallographiques, les mesures de la dureté et de la microdureté ainsi que l'analyse chimique semi-quantitative effectuée au moyen de steeloscope.

Les recherches sur le développement de la technologie de métaux en Pologne ont été initiées par la Section d'Histoire de la Technique de Métallurgie et Fonderie, créé en 1955 et faisant partie du Comité d'Histoire de la Science près l'Academie Polonaise des Sciences. Les travaux da la Section comprenaient entre autres les examinations des anciens produits de fer provenant des temps les plus reculés jusqu'à la fin du XIX-ème siècle, c'est-à-dire jusqu'à à l'époque où on avait introduit dans les usines polonaises le contrôle de laboratoire de la production industrielle.

On a présenté ci-dessous une vue générale de la technologie des produits de fer en Pologne à partir des temps les plus anciens basée sur les examinations de plus de 400 outils et autres objets.

---

[10] C. Livadefs, *Structural iron of the Barthenon*, „Journal of the Iron and Steel Institute", 1956, t. 182, partie 1.

[11] R. Pleiner, F. Plzak et Q. Quadrat, *Poznamky k vyrobnu technice staroslovanskych cepeli*, „Pomátky archeologiské", 1956, t. 47, p. 314.

[12] C. Panseri, C. Carino et M. Leoni, *Ricerche metallografiche sopra alcune lame gli antichi*, Milano, 1957, p. 7.

[13] A. Krupkowski, T. Reyman, *Badania metaloznawcze nad przekutym półfabrykatem żelaza z Witowa, pow. Pińczów i żużlem dymarkowym z Igołomii, pow. Miechów*, „Sprawozdanie Państw. Muzeum Archeologicznego", 1953, t. 5, no 1—2, p. 48.

[14] A. Zbierski, *Wczesnośredniowieczne górnictwo i hutnictwo w świetle materiałów z grodziska Tęczyckiego*, „Studia Wczesnośredniowieczne", 1955, t. III, p. 248.

[15] B. A. Kołczin, *Czornaja mietałłurgija i mietałłoobrabotka w drewniej Rusi*, „Materiały i issledowanija po Archeologii SSSR", t. 32, Moscou 1953.

MÉTHODES DE RECHERCHES

Les examinations métallographiques ont surtout pour but d'établir la méthode de la fabrication des anciens objets [16]. Ces examinations ne peuvent pas se limiter aux produits métalliques, elles doivent concerner tous les objets liés avec la métallurgie comme par exemple les restes exploités de minerai, de charbon de bois et de laitier ainsi que les moules, les débris de creusets et de tuyères, etc.

Les examinations métallographiques des objets archéologiques ont leur caractère spécifique et se distinguent des examinations analogues des produits de la technique moderne. La différence est dans les buts que visent les recherches: les examinations des objets archéologiques doivent rendre possible la reconstruction de la technologie de leur fabrication tandis que les examinations des produits de la technique moderne se posent pour but la définition du rapport de la structure et des propriétés de métal avec les normes établies. En dehors de cela en ce qui concerne ces dernières nous ne sommes pas gênés dans les recherches ne craignant pas de détruire la pièce examinée tandis qu'en examinant les objets archéologiques nous devons établir la méthode de recherches de cette manière que le moindre endommâgement de l'objet nous apporte le plus grand nombre de données concernant sa fabrication [17].

C'est pourquoi dans nos examinations nous nous sommes occupés en premier lieu à établir l'emplacement de la découpure des échantillons pour les recherches des outils et des produits de formes differentes. On a établi que l'échantillon doit être découpé dans une partie caractéristique pour le travail des outils (par exemple la lame du couteau, de la faucille, etc.); en plus — pour la comparaison — dans certain cas on découpe l'échantillon aussi dans la partie non travaillante (la douille de fer de la lance, la poignée de l'épée etc.).

---

[16] Le but des examinations des anciens outils de fer et d'autres produits ainsi que les cxemples de la mise en profit des résultats de ces recherches par les archéologues ont été décrits d'une façon plus détaillée dans la publication: J. Piaskowski: *Co dają badania metaloznawcze źródeł archeologicznych*, „Dawna Kultura", 1956, No 4, p. 250.

[17] Les méthodes métallographiques dans les examinations des anciens produits métalliques ont été décrites avec tous les détails dans la publication de J. Piaskowski: *Metody metaloznawcze w badaniach zabytków archeologicznych*, „Sprawozdania Archeologiczne", Warszawa-Wrocław-Kraków 1957, t. III, p. 284; aussi: J. Piaskowski: *Badania przedmiotów metalowych z grodziska w Zawadzie Lanckorońskiej (pow. Brzesko)*, „Kwartalnik Historii Nauki i Techniki", 1956, no 2, p. 375.

La surface polie pour les examinations métallographiques doit être préparée sur la face perpendiculaire où parallèle aux directions supposées du procédé technologique comme, par exemple, la cristallisation du métal coulé et — dans le cas du fer — la carburation et le traitement plastique.

On fait les observations métallographiques de la structure du métal au grossissement 100 et 500 × pour démontrer la structure où on applique l'attaque de la 4% solution de l'acide nitrique dans l'alcool (nital). En même temps on détermine la classe de la grosseur du grain à la base de la norme américaine ASTM E 19—46 et on fait les mesures de la microdureté (à l'aide du microduremètre d'Hanemann) de tous les constituantes de la structure. Aux examens de la microdureté on applique la charge 50 G. Chaque résultat devrait présenter la moyenne d'au moins 5 mesurages.

Ensuite on mesure la dureté Vickers appliquant pour le fer et pour l'acier non trempé la charge de 10 kg et pour l'acier trempé, celui de 30 kg. La pression dure 15 secondes. Chaque resultat présente la moyenne de 2—3 mesurages par rapport aux dimensions de l'échantillon.

Après l'examination de la duréte on fait l'analyse qualitative à l'aide de spectrographe ISP-22. L'arc est suscité entre les deux échantillons du même matériau. En présentant les résultats de l'analyse spectrale on peut négliger la présence du fer, du carbone, du silicium, du manganèse, du phosphore et du souffre qui se trouvent toujours dans le fer et l'acier. Le signe „+" désigne la présence de l'élément résiduel qu'on a pu exactement déterminer tandis que signe „o" ne témoigne que de la présence des dernières lignes de spectre de l'élément.

Enfin, on fait l'analyse chimique des composants fondamentaux du fer et de l'acier. Pour le fer à loupes c'est la dosage de la teneur en phosphore qui a l'importance principale étant donné que cette addition exerce une influence décisive sur les propriétés du métal et sa quantité peut même atteindre 0,95% P. Le teneur en autres composants comme carbone, silicium, manganèse, souffre et nickel est très bas et n'atteint qu'un pourcentage de quelques centièmes, donc il ne dépasse pas beaucoup l'erreur de l'analyse chimique.

Quant aux examinations de l'acier de four à loupes, en dehors de phosphore c'est aussi la teneur en carbone qui a une grande importance. Toutefois dans ce type de l'acier nous observons souvent

les grandes différences de concentration de cet élement et c'est pourquoi il faut baser la determination de sa teneur plutôt sur des observations métallographiques; on ne peut pas appliquer la méthode chimique dans le cas d'une structure non homogène.

Aux examinations de fer et de l'acier du foyer d'affinerie ainsi qu'à celles des échantillons de la fonte il faut faire l'analyse chimique complète y compris les constituants fondamentaux: C, Si, Mn, P, S et, si possible, le dosage de Ni, Cu, Ti, V etc.

Les examinations de laitier et de minerai comprenaient également l'analyse chimique qualitative (spectrale) et quantitative ainsi que le mesurage du poids spécifique et de la température de fusion.

Pour l'illustrer au moyen d'exemples, on a présenté sur les tableaux 1—5 quelques résultats des examens de minerai, de laitier et des produits de fer, derivés des différentes époques.

EXAMINATIONS SUPPLÉMENTAIRES

Les travaux devant faire connaître le développement de la technologie des produits de fer ont demandé toute sorte de recherches supplémentaires.

A ce genre de recherches appartenait aussi l'établissement de la méthode de nettoyage des échantillons pris des produits conservés par le paraffinage. Les traces de la paraffine qui restent sur l'échantillon contribuent à une très grave erreur lors du dosage de carbone dans le métal [18].

On a aussi établi l'exactitude du dosage de la teneur en phosphore dans le fer four à loupes en fonction du poids de l'échantillon. Ce problème a une importance essentielle pour les recherches des objets du début du moyen-âge nommés „les produits à barres multiples", c'est-à-dire scudés de plusieurs barres de fer et de l'acier.

On obtient les résultats exacts du dosage de la teneur en phosphore du fer de four à loupes lorsque le poids de l'échantillon analysé est égal à 1 gramme. Quand celui-ci est moindre et égale par exemple 0,1 gramme les divergences de résultats obtenus atteignent 0,09% P.

En dehors de cela on a réalisé les essais pour choisir le meilleur réactif pour les examinations de la segrégation de phosphore dans

[18] R. Romanski, *La dosage de la teneur en carbone dans les objets archéologiques de fer* (en préparation).

le fer de four à loupes. On a obtenu les meilleurs résultats en se servant du réactif d' Oberhoffer [19].

On a aussi élaboré une prompte méthode de l'examen des outils du début du moyen-âge fabriqués au moyen de la technique à barres multiples. Cette méthode se caractèrise par le nettoyage de la rouille de la surface du métal sur une longueur d'environ 1 cm et par plusieurs attaques faites alternativement à l'aide de l'acide nitrique concentré et dèlayé. La méthode élaborée permet de distinguer les couches de fer et de l'acier trempé (à consulter fig. 16).

On a aussi réalisé des essais de laboratoire de la reduction de minérai ferreux à l'aide du charbon de bois; ce qui permet de mieux connaître le procédé de la réduction de fer dans le four à loupes.

La fig. 1 présente la structure de fer réduit à la température de 1250°C dans les conditions de laboratoire; elle était trop basse pour que la fusion du laitier puisse avoir lieu. Le reste du minérai non réduit est visible dans les limites des grains de métal. C'est seulement après la réduction du minérai de fer à la température 1350°C que s'était produite la fusion du laitier et sa séparation du métal (fig. 2).

LA TECHNOLOGIE DE FER PENDANT LA PÉRIODE D'HALSTATT

Le fer apparaît en Pologne déjà au cours de la V-éme période de l'époque de bronze mais en quantités très restreintes. Nous rencontrons de plus grandes quantités d'outils et de produits de fer comme de haches à douille, des couteaux et des faucilles sur les territoires de la Pologne pendant la période d'Halstatt entre le VII et le IV-ème siècle avant J. C. C'est de cette époque que datent deux loupes de Przybysław district de Jarocin [20].

Les produits de fer examinés qui proviennent de la période d'Halstatt étaient fabriqués de fer réduit dans le four à loupes. La teneur en phosphore plus élevé (0,2 — 0.5% P) dans certains produits montre qu'à la période d'Halstatt on se servait pour la production de fer, aussi de minerais de marrais au pourcentage de phosphore très élevé (tabl. 1 et 3). Ces minerais apparaissaient souvent en Pologne et étaient largement exploités dans les époques postérieures. Quoiqu'

---

[19] K. Sękowski, *Les examinations de la segrégation du phosphore dans le fer de four à loupes.* Kraków 1956, (non publié).

[20] J. Kostrzewski, *Wytwórczość metalurgiczna w Polsce od neolitu do wczesnego okresu żelaznego*, „Przegląd Archeologiczny" 1951—1952, t. IX, no 2—3, p. 177.

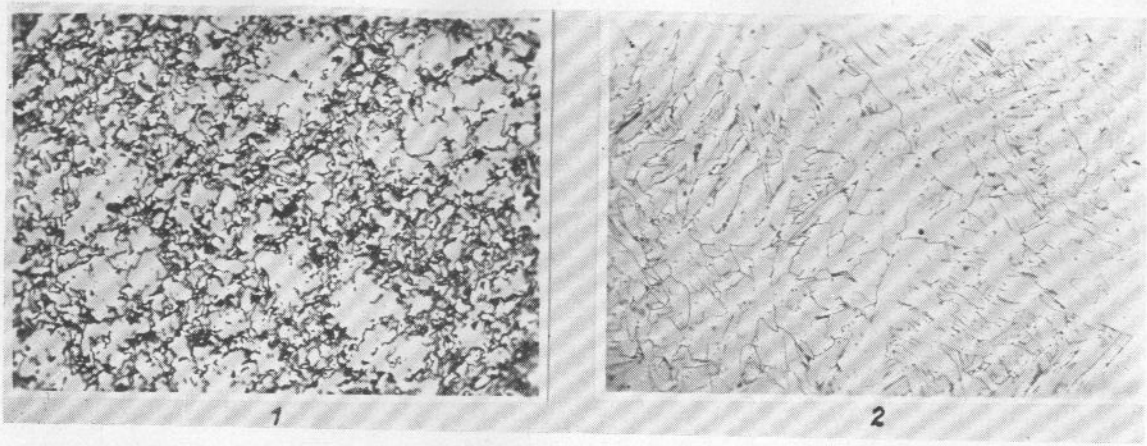


Fig. 1. Structure du fer réduit du minerai à la température de 1250°C par le charbon du bois (la méthode de four à loupes) dans les conditions de laboratoire. Autour de grains de métal on peut voir les restes du minerai non réduit. Sans attaque, grossissement 100 ×.

Fig. 2. Structure du fer réduit de minerai à la température 1350°C par le charbon de bois dans les conditions de laboratoire: ferrite. Attaque nital, grossissement 100 ×.

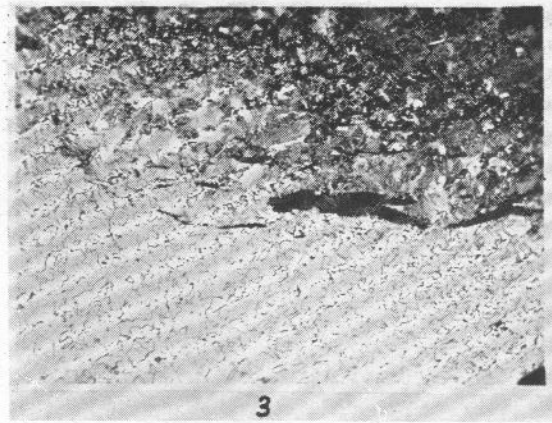


Fig. 3. Structure à la surface d'un couteau carburé de ville fortifiée de Słupca, district de Konin (période d'Halstatt): dans la partie carburée (en haut) martensite et troostite; dans la partie non carburée (en bas) — ferrite. Attaque nital, grossissement 100 ×.

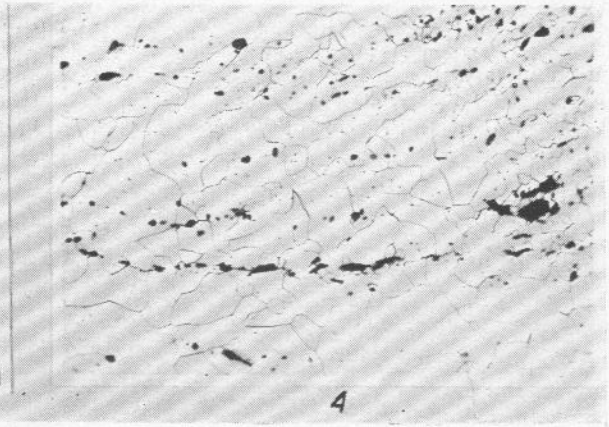


Fig. 4. Structure d'une faucille de fer de la ville fortifiée à Biskupin, district de Znin (période d'Halstatt): ferrite et petite inclusion de laitier. Attaque nital, grossissement 100 ×.

on n'ait pas trouvé jusqu'ici en Pologne de vestiges des anciens fours à loupes et du laitier qu'on pourrait attribuer à la période d'Halstatt — il est possible que c'est à cette époque qu'on avait commencé la production de fer sur les territoires polonais.

Le procédé de la production de fer dans le four à loupes consistait dans la réduction du minerai de fer à l'aide du charbon de bois. La réduction de fer se produit très facilement à la température de 1000—1200°C. Mais le plus difficile c'est d'obtenir le laitier en état de liquide ce qui permet de séparer le métal réduit du laitier. Pour obtenir le laitier en état liquide on devait obtenir dans le four à loupes la température de 1200 à 1400°C.

Les recherches ont démontré que la loupe de Przybysław (district de Jarocin) est un morceau de fer au pourcentage de phosphore bien élevé (tabl. 2), contenant des quantités considérables de laitier. Ce métal est comme il semble un produit local — tandis que la loupe de Witow (district de Pińczów) examinée autrefois par A. Krupkowski et T. Reyman [21] présente probablement plutôt une importation de la Rhênanie. Les loupes de cette forme y apparaissent très souvent, et les recherches de H. Hanemann [22] d'une loupe de Rheinhausen Amt Bruchsel ont montré une composition chimique analogue (la teneur en phosphore).

Toutes les haches examinées (Szczonów, district de Jarocin), Łuszkowo (district de Koscian), Goplano (district de Aleksandrow), Kwaczała (district de Chrzanow), provenant de la période d'Halstadt étaient forgées du fer à loupes, leur pointe était carburée, et elles étaient traitées thermiquement.

Le couteau de la ville fortifiée de la culture lusacienne à Słupca (district de Konin) était carburé et trempé d'une façon analogue, probablement dans l'eau (fig. 3); tandis que le couteau de fer de Biskupin (district de Znin) n'était durci que par le martelage à froid. La plupart des faucilles de la ville fortifiée de la culture lusacienne à Biskupin étaient faites de fer de four à loupes et sans qu'on n'y eu appliqué des procédés pour durcir le métal (fig. 4).

Une des faucilles de Biskupin a montré une très curieuse technologie; elle a été fabriqué au moyen de soudage de quelques barres de fer et de l'acier doux (contenu d'environ 0,2%C) tournés ensemble (fig 5). Cette faucille est le plus ancien produit soudé de fer et

[21] A. Krupkowski, T. Reyman, op. cit.
[22] H. Hanemann, op. cit.

d'acier qui ait été examiné. Par contre, la faucille de la ville fortifiée de la culture lusacienne à Słupca, district de Konin, était carburée sans être trempée.

Tous les bracelets examinés (Szczonow, district de Jarocin, Maszkow, district de Olkusz, Słupca, district de Konin, Biskupin, district de Znin) étaient produits de fer à très bas pourcentage de phosphore. Ce qui est caractéristique c'est une carburation très irrégulière qu'on a pu observer dans ces bracelets (fig. 6); dans certains endroits la teneur en carbone atteint jusqu'à 1,1%C.

La ségregation du carbone dans le métal montre que la carburation a eu lieu au cours de la réduction de métal du minerai dans le four à loupes. La mention sur la monnaie de Sparte que nous trouvons chez Plutarque [23] est un argument sur la production de fer carburé directement dans les anciens fours.

Il est aussi probable qu'on ait obtenu cet acier au moyen de la décarburation de la fonte. Les anciens écrits d'Aristote [24] et de Pline [25] indiquent d'une façon tout à fait nette que dans l'Antiquité on a élaboré la fonte. Aristote [26] décrit la méthode d'élaboration de l'acier par la décarburation de la fonte.

Le fer de la lance de Łuszkow (district de Koscian) était fait en acier à concentration irregulière de carbone et l'épingle à cheveux de Biskupin (district de Znin) était faite en acier demi-dur.

Parmi les 13 outils examinés de la période d'Halstatt, une partie considérable n'était pas durcie. Un peu plus que la moitié des outils (7) était carburée, dont presque tous (6) étaient traitées thermiquement. La barre de la ville fortifiée à Słupca (district de Konin) a subi le recuit amolissant et a démontré la structure de la cementite globulaire.

LA TECHNOLOGIE DE FER PENDANT LES PÉRIODES DE LA TÈNE ET ROMAINE

La technologie des produits de fer de la période d'Halstatt qui se caractérisait par le forgeage des objets de fer, par la carburation des parties de travail de l'outil et par le traitement thermique, apparaît sur certains territoires de la Pologne aussi pendant les

[23] Plutarque, *Cztery żywoty (Lysandre, Sulla, Demosthène, Cicéron)*, Traduit par M. Brożek, Czytelnik, Warszawa 1954, p. 46.
[24] Aristote, *Meteorologica*, livre IV, chapitre 7.
[25] C. Plinius Secundus, *Historia Naturalis*, livre XXXIV, chapitre 41.
[26] Aristote, *Meteorologica*, Livre IV, Chapitre 6.

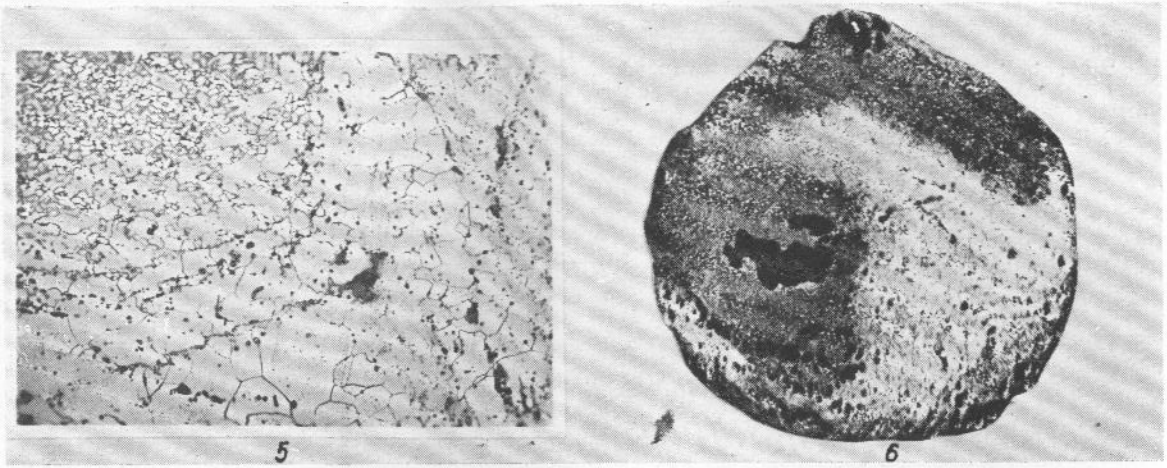
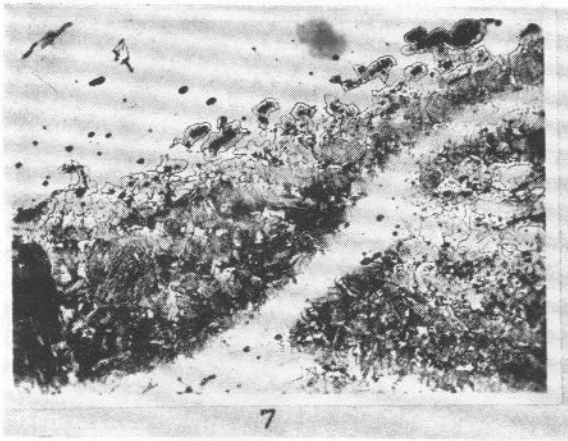


Fig. 5. Structure d'une faucille soudée de barres de fer et de l'acier doux de la ville fortifiée à Biskupin, district de Znin (période d'Halstatt): dans la partie en acier (en haut à gauche) — ferrite et petites quantités de la perlite, dans la partie ferreuse — ferrite et les petites inclusions de laitier. Attaque nital, grossissement 100 ×.

Fig. 6. Macrostructure sur la coupe transversale d'un bracelet de Szczonów, district de Jarocin (période d'Halstatt). Les parties carburées sont plus obscurcies. Attaque nital, grossissement, environ 7 ×.



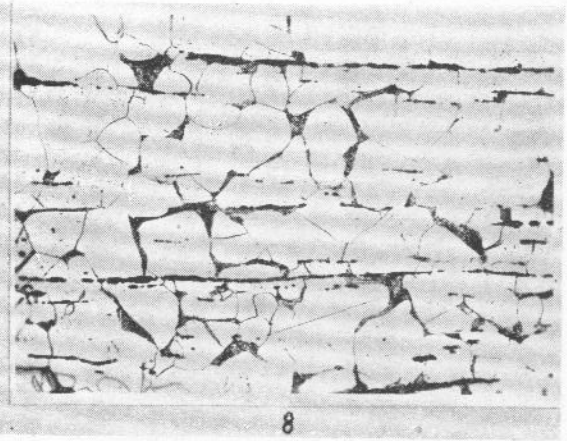


Fig. 7. Structure d'un couteau de Biskupin (III—IV-ème siècle après J. C.) soudé des barres de fer carburées; — martensite, dans les parties noncarburées — ferrite. Attaque nital, grossissement 100 ×.

Fig. 8. Structure d'une épée de Jadowniki Mokre, district de Dąbrowa Tarnowski (1-er siècle avant J. C.): ferrite et petites quantités de la perlite. Attaque nital, grossissement 100 ×.

period de La Tène et romaine. C'est de cette façon qu'étaient fabriqués les outils agricoles trouvés à Wyciąze district de Kraków (II — I siècle avant J.C.) et à Igołomia, district de Proszowice (II—VI-ème siècle après J.C.). Les examinations de ces derniers produits ont montré entre autres l'application du recuit amolissant (structure de perlite globulaire).

D'une façon analogue étaient carburés et trempés la hache et le couteau provenant du village Szwajcaria (district de Suwałki) où habitaient à cette époque (III—IV siècle avant J.C.) les Jacwings.

Un autre produit intéressant c'est aussi un couteau provenant de Biskupin (III—IV-ème siècle aprés J.C.) soudé de barres de fer carburées et trempées (fig. 7). Cette forme de fabrication peut être considerée comme le premier modèle des produits soudés au moyen de la technique de „damas".

Pendant la période de La Tène et romaine en Grande Pologne (Drzonek, district de Srem, Borowo, district de Kościan, Domaradzice, district de Rawicz, Młodzikowo, district de Środa, Wymysłowo, district de Gostyn) et en Petite Pologne (Jadowniki Mokre, district de Dąbrowa Tarnowska) [27] apparaît une nouvelle technologie des produits de fer caractéristique pour cette époque. Elle se caractérise par la fabrication des outils et des objets tout à fait en acier contenant un pourcentage de carbone très différent à partir de très bas (0.15%C) jusqu'à très élevé (environ 1,0%). C'est un métal de haute qualité — la teneur en phosphore est bas en général. Comme il semble, les produits provenant de la période de La Tène sont fails en acier doux et ce n'est qu'au I-II-ème siècle après J.C., qu'apparait l'acier dure. Ce fait est lié probablement au progrés de la technique de la reduction de minerai (fig. 8 et 9).

Cet acier servait non seulement à fabriquer des outils: (couteaux, ciseaux, briquets) et des pièces dsarmes (épées, fers de lance, etc.) mais aussi des produits tels que les éperons, les clous qu'on pouvait aussi fabriquer à base de fer.

Les recherches indiquent que dans les périodes de La Tène et romaine apparaissent sur des territoires polonais de grandes quantités d'outils et de pièces d'armes produits entièrement en acier. Il est probable, que ces objets proviennent du centre métallurgique très

[27] J. Piaskowski, *Metalurgia żelaza w okresie lateńskim i rzymskim w dorzeczu górnej Wisły w świetle badań metaloznawczych, Z dziejów starożytnej metalurgii na ziemiach Polski Południowej*, Kraków 1956, p. 41.

connu dans les montagnes Świętokrzyskie [28] où à cette époque on a produit de grandes quantités de fer.

Les produits de La Tène et romains examinés jusqu'ici proviennent des cimetières crématoires et pour cette raison on ne peut pas constater si ces outils étaient traîtés thermiquement; il semble plutôt que ces produits ne subissaient pas le traitement thermique.

A cette occasion il faut ajouter que dans les parties moins carburées de ces produits on observe dans les grains de ferrite une structure aciculaire (les nitrures?) dont le genre et la provenance n'ont pas encore été établis (fig. 10).

Une technologie spécialement intéressante démontre l'épée de Sobotka, district de Ostrow (II siécle apiès J.C.). Sa structure se compose des couches de fer (structure ferritique) et des couches de l'acier (structure perlitique-ferritique). Ces couches sont disposées d'une façon qui vise l'utilité — les pointes de l'épée sont dures et au centre de la lame l'on voit le dessin caractéristique (fig. 11 et 12). Comme il semble, c'est un produit fait en „damas naturel" dont il est encore difficile d'expliquer la fabrication, car il faut remarquer que dans la structure l'on ne voit pas de traces de soudage des couches respectives qui ont dû être disposées autrement. On parle dans la suite de ce travail des produits de „damas artificiel", soudé de fer et d'acier.

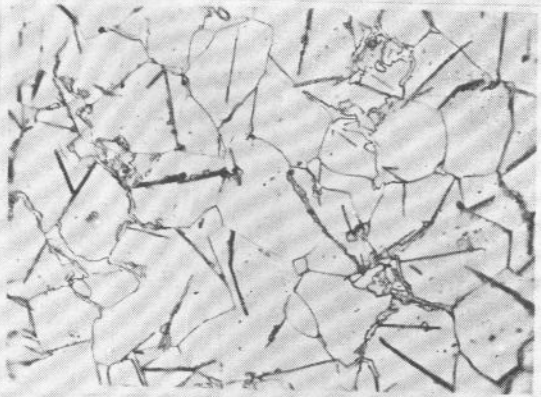
La technologie des produits de fer de la période suivante VI—VIII-ème siècle après J.C. n'a pas encore été examinée étant donné qu'on avait trouvé seulement des quantités bien restreintes d'objets en métal datant de cette époque.

TECHNOLOGIE DE FER AU DÉBUT DU MOYEN-ÂGE

Au début du moyen-âge la technologie dont on vient de parler qui se caractérisait par la fabrication d'outils et de produits usuels disparait complétement sur les territoires de la Pologne. Mais on y rencontre encore surtout jusqu' au X-ème siècle la technologie de fer caractéristique pour la période d'Halstatt — on a produit les outils de fer, on a durci les parties de travail par la carburation et le traitement thermique. C'est de cette manière qu'on fabriquait

[28] M. Radwan, *Z dziejów wytopu. Ślady techniki pierwotnej wytapiania żelaza w Górach Świętokrzyskich*, „Hutnik" 1937, no 9, p. 3; aussi: K. Bielenin, *Z badań nad starożytną produkcją żelaza w Małopolsce*, „Sprawozdania Archeologiczne" 1957, t. III, p. 91.

9



10

11

Fig. 9. Structure d'un fer de lance de Jadowniki Mokre, district de Dąbrowa Tarnowska (II-ème siècle après J. C.): perlite et cementite hypereutectoidale sur les limites des grains. Attaque nitat, grossissement 100 ×.

Fig. 10. Structure d'une alêne de Domaradzice, district de Rawicz (I siècle après J. C.): grains de ferrite avec une phase aciculaire non déterminéee (nitrures?) Attaque nital, grossissement 500 ×.

Fig. 11. Macrostructure sur la coupe transversale d'une épée de Sobotka, district de Ostrow (II siècle apres J. C.). Les couches carburées sont plus obscurcies. Attaque nital. Grossissement environ 2,5 ×.

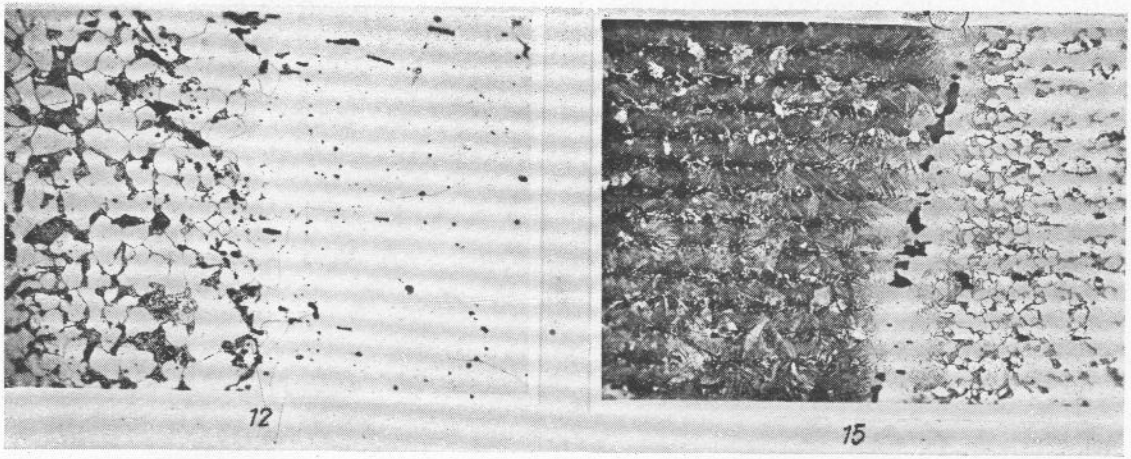


Fig. 12. Structure d'une épée de Sobotka (district de Ostrów): l'on voit une couche à grains fins de perlite et ferrite (à gauche) et une couche de ferrite à grains plus gros (à droite). Attaque nital, grossissement 100 ×.

Fig. 15. Structure de fer de lance de Lutomiersk, district de Łask (première moitié du XI-ème siécle): dans la partie en acier (a gauche) martensite; dans la partie en fer (à droite) — ferrite. Dans la soudure on voit des inclusions de laitier. Attaque nital, grossissement 100 ×.

souvent des haches, des faucilles et parfois aussi des fers de lance, des épées, des alênes.

Toutefois il y a une autre nouvelle technologie qui est très caractéristique pour le moyen-âge. Elle apparait en Pologne probablement entre le IX et le XI-ème siècle et il est même possible que dans certaines régions plus tôt.

Cette technique qu'on peut appeler „technique des produits à barres multiples" consiste en soudage du fer et de l'acier, et il faut remerquer que c'est seulement la partie de travail de l'outil qui était faite en acier. Probablement, on appliquait aussi la dite technologie en France déjà au V—VIII-ème siècle [29]; toutefois, il semble que ses origines peuvent remonter aux temps romains. Cela nous est suggéré par un fragment de *Historia naturalis de Pline* [30].

Ce type de technologie contribue à une grande variété dans la manière de fabrication des différents outils dans les centres divers de l'ancien artisanat. En raison de cela la quantité des différentes méthodes de fabrication constatées est très grande et dépend du caractère de l'endroit.

L'indicateur définissant le rapport entre la quantité des méthodes d'exécution et toute la quantité d'outils examinés dans les anciens centres métalluriques n'est pas élevé et par exemple pour les couteaux de Tum près de Łęczyca (XII—XIII-e siècle) il atteint à peine 0.40. Par contre dans les villes maritimes et dans les châteaux où on faisait venir une quantité considérable de produits des régions plus éloignées et même de l'étranger, cet indicateur est plus haut et atteint par exemple pour les couteaux de Gdańsk (X—XIII-ème siècle) — 0,70, et pour le couteaux de château Wawel à Cracovie (XI—XIII-ème siècle) — 0,67.

Une description plus détaillée des méthodes de fabrication des différents outils au début du moyen-âge étant donné leur grande variété, dépasse le cadre de ce travail. Nous allons donc seulement présenter avec plus de détail la technologie de la fabrication des couteaux.

Nous distinguons deux types technologiques par rapport à la répartition des parties en acier dans un couteau. Dans le premier cas, la partie d'acier (la barre) coïncide avec la partie de fer le long

[29] E. Salin, op. cit.
[30] C. Plinius Secundus, *Historia naturalis*, livre XXXIV, chapitre 41.

d'une seule surface (fig. 13a), tandis que dans l'autre cas la partie d'acier se trouve entre deux couches (barres) de fer et coïncide avec elles par les deux surfaces (fig. 13b). En Pologne apparaissent pour

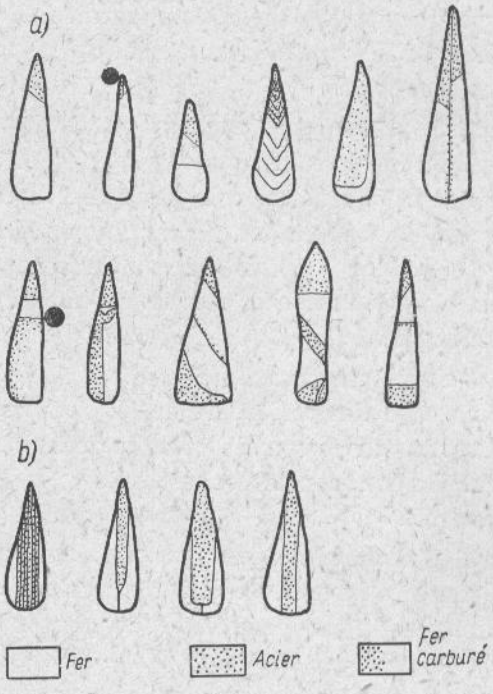


Fig. 13. Méthodes fondamentales de fabrication des couteaux à barres multiples au début du moyen-âge (coupe transversale du couteau), a) la partie d'acier coincide avec la partie de fer le long d'une seule surface, b) la partie d'acier se trouve entre deux couches de fer.

la plupart les formes de la technologie de premier type tandis que dans la Ruthénie du moyen-âge le deuxième type est dominant.

La surface de soudage de la bande d'acier avec la partie ferreuse peut être droite ou dentelée (fig. 14). Ces deux types de bandes étaient produits en Pologne (Tum près de Łęczyca XII—XIII-e siècle).

D'une façon analogue était compliquée la technologie de la fabrication de fer de lance (particulièrement celle des matériaux provenant du cimetière de Lutomiersk district de Łask, XI-ème siècle), des épées, des haches, des poinçons, des briquets et des alênes.

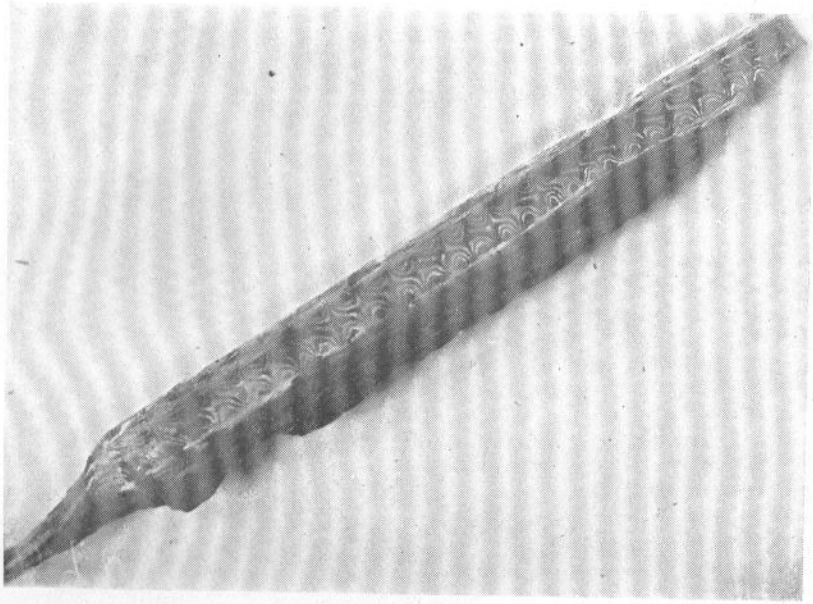


Fig. 16. Couteau (technique de „damas") de Gdańsk (XII—XIII-ème siècles) après le nettoyage de la surface et l'attaque de l'acide nitrique tour à tour concentré et délayé. Les parties en acier sont devenues plus obscures.

La fig. 15 présente la structure dans la couche de soudage de fer et d'acier dans le fer de lance de Lutomiersk, district de Łask (première moitié de XI-ème siècle). Le fer de lance étant trempé.

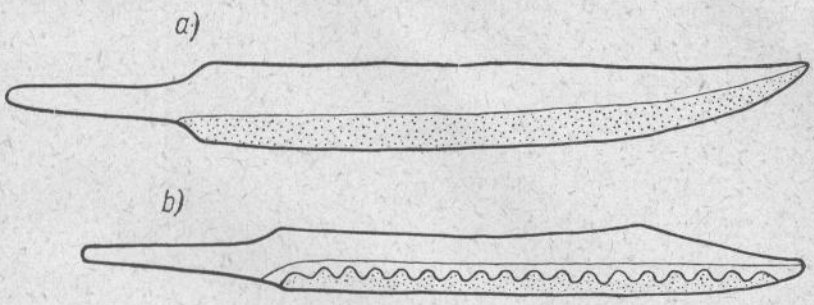


Fig. 14. Deux formes fondamentales des bandes en acier appliquées à la fabrication des couteaux au début du moyen-âge en Pologne, a) bande droite, b) bande dentelée.

La technique des produits à barres multiples demandait une excellente connaissance de la technique du soudage de fer et d'acier. Une méthode très curieuse répandue entre autres à Tum près de Łęczyca (XII-ème siècle — XIII-e) était le soudage de fer et de l'acier à l'aide d'un mince flipot (épaisseur d'environ 1 mm) placé entre eux et fait en fer au pourcentage très élevé de phosphore pour faciliter le soudage. On peut observer très souvent cette méthode de soudage sur des fers de lance du cimetière à Lutomiersk, district de Łask (XI-ème siècle).

La technologie d'autres produits de fer tels que: étriers, éperons, fers à cheval, clés, fermails de ceintures, aiguilles, clous, ferrements de seaux était assez simple. On les fabriquait en fer sans les durcir, excépté les cas tout à fait spéciaux (par exemple le fer à cheval carburé de poste militaire à Piekary, près de Cracovie, XIII-ème siècle).

Comme la plus magnifique réussite de la technique du début du moyen-âge sont les épées et les couteaux dits produits par la technique de „damas". Parmi les 84 couteaux examinés du moyen-âge, qu'on avait trouvé en Pologne il y a trois couteaux du château de Wawel à Cracovie et deux couteaux de Gdańsk qui représentent cette technique (fig. 16). La technique de „damas" se caractérise par un soudage des barres de fer et d'acier et par un traitement thermique qui contribue à la formation des structures dont l'attaque se

produit facilement dans des acides délayés (surtout la troostite). Grâce à cela nous pouvons observer le caractéristique dessin de „damas".

Au moyen-âge, on appréciait justement la qualité du fer et de l'acier à la base de la teneur en phosphore dans le métal. Pour la production des objets exposés au choc (éperons, étriers, ferrages de

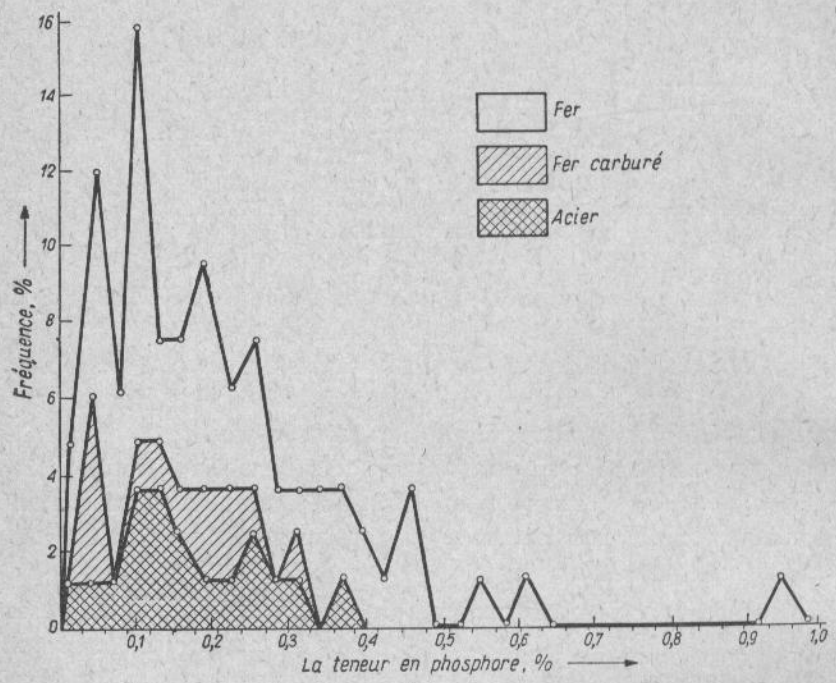


Fig. 17. La courbe de fréquence de la teneur en phosphore dans les produits de fer et d'acier du cimetière de Lutomiersk, district de Łask (première moitié du XI-ème siècle). D'après 83 analyses.

seaux), on employait le métal avec la teneur en phosphore tres basse. De même pour la production de l'acier on destinait le métal (où minerai) à basse teneur en ce nuisible élément résiduel.

On peut l'illustrer par la comparaison de courbes de fréquence de la teneur en phosphore dans les produits de Lutomiersk, district de Łask (seconde moitié du XI-ème siècle) et de Piekary, près de Cracovie (XIII siècle) — (fig. 17 et 18). Nous voyons que dans les produits d'acier de Lutomiersk la teneur en phosphore atteint 0,32% P, tandis que dans les produits de Piekary — seulement 0,14% P.

La technique des produits à barres multiples caractéristique pour le début du moyen-âge, présentée ci-dessus a son fondement technique et social-économique. Grâce à elle les outils résistaient au choc

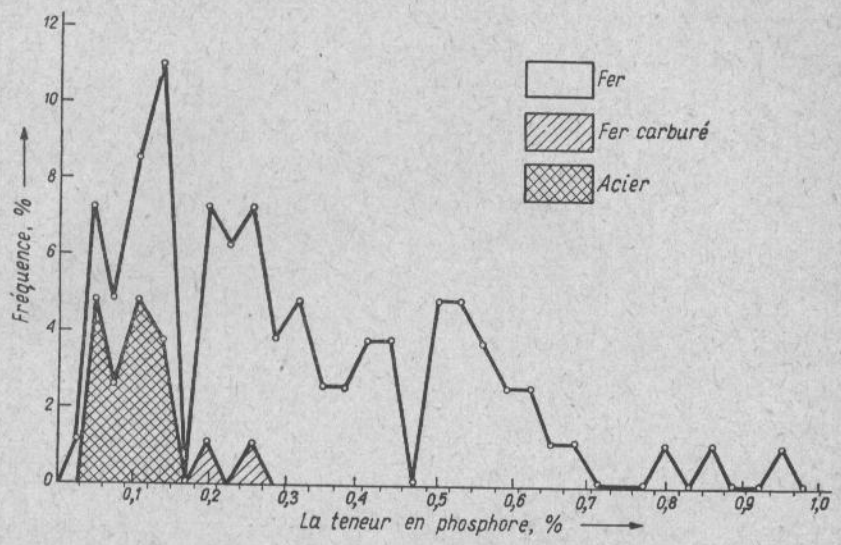


Fig. 18. La courbe de fréquence de la teneur en phosphore dans les produits de fer et d'acier de la ville fortifiée á Piekary, près de Cracovie (fin du XIII-ème siècle). D'après 85 analyses.

(partie de fer) et ils possédaient en même temps la très dure partie de travail (l'acier trempé).

En dehors de cela, cette technologie favorisait la plus grande économie de l'acier dont les propriétés étaient mises à profit en mesure maximum. Cette condition avait l'importance décisive étant donné qu'au début du moyen-âge le besoin d'acier devait être très grand; il était lié au développement des forces productives et en même temps au développement social et la formation des nombreux états en Europe Centrale et Orientale.

TECHNOLOGIE DE FER VERS LA FIN DU MOYEŃ-ÂGE ET DANS LES TEMPS MODERNES

L'introduction de la propulsion à l'eau des soufflets dans la métallurgie de fer contribua au changement de la construction de four à loupes en four à cuve (le soi-disant four „Stueckofen", plus

tard le „Flossofen" et puis le grand fourneau employé à l'heure actuelle). Grâce à une température plus élévée on avait obtenu dans le four à cuve un plus grand degré de carburation du métal. Ainsi, les produits du four „Strickofen" sont, suivant la méthode de la fusion, l'acier ou la fonte liquide [31].

La fonte obtenue par la réduction du minerai dans le haut fourneau à l'aide du charbon de bois, contient en général beaucoup de carbone tandis que la teneur en souffre y était très bas. La teneur en phosphore dépendait de la quantité de cet élément dans le minerai.

La teneur en silicium dépendait de la température du procès. Dans ces conditions la teneur en silicium décidait de la structure et des propriétés de la fonte. A la basse température du procès de la réduction („l'allure froide de four") on obtenait la fonte à la basse teneur de silicium (au dessous de 0,8% Si); c'était la fonte blanche.

Lorsque la température du procès était élevée („l'allure chaude du four") la teneur en silicium dans la fonte était plus élevée et on obtenait la fonte grise. La fonte obtenue dans des conditions intermédiaires avait la structure truitée.

Dans les premières périodes de l'application des hauts-fourneaux (XVI—XVIII-ème siècle) dans la métallurgie, la structure de la fonte était plutôt accidentelle. Mais avec le temps on a appris à produire la fonte à la structure désirée en appliquant à la fusion de la fonte une plus grande addition de charbon de bois. L'introduction du vent chaud au haut fourneau, chose appliqué en Pologne dans la seconde moitié du XIX-ème siècle [32] avait une très grande importance dans la métallurgie de fer.

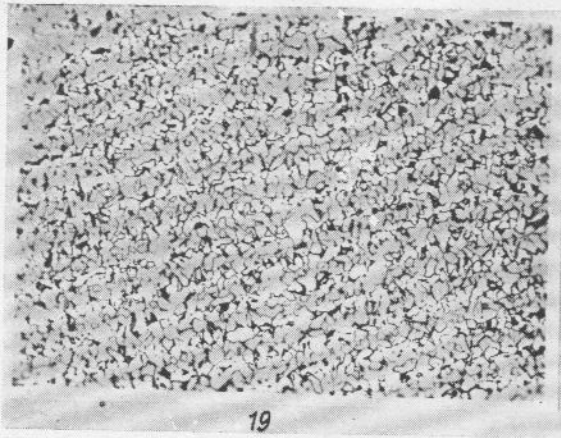
La fonte était partiellement transformée en fer ou en acier et partiellement on en produisait les moulages. On produit le fer affiné par la décarburation de la fonte (pour ce but on appliquait surtout la fonte blanche [33] dans le foyer d'affinerie). Le fer affiné ne contient que peu de laitier et possède en général une structure à grain très fin (fig. 19). Lorsque la décarburation n'a pas été assez forte dans

---

[31] W. de Saint Ange (trad. allemande C. Hartmann), *Praktische Eisenhüttenkunde*, Weimar 1839; aussi: J. Piaskowski, *W jaki sposób uzyskano w Europie po raz pierwszy żeliwo*, „Przegląd Odlewnictwa", 1956, no 11, p. 335.

[32] M. Radwan, *Wielkopiecownictwo w Zagłębiu Staropolskim w połowie XIX wieku*, Katowice 1954.

[33] W. de Saint Ange, op. cit.



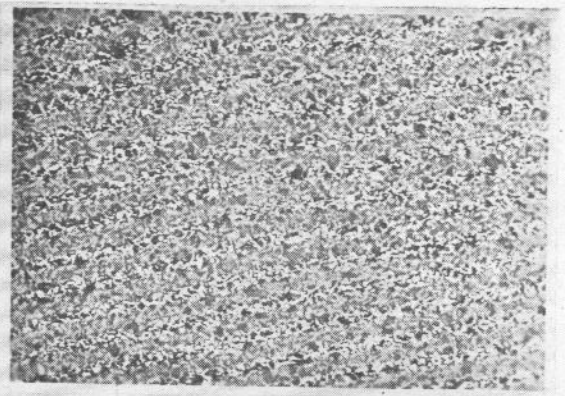
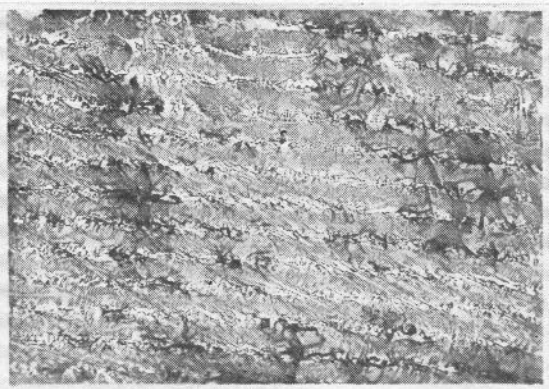


Fig. 19. Structure de fer affiné (clou de Sielpia, moitié du XIX-ème siècle): ferrite à grains fins. Attaque nital, grossissement 100 ×.

Fig. 20. Structure de l'acier affiné (burin de Chlewiska, XIX-ème siècle): perlite et ferrite. Attaque nital, grossissement 100 ×.

21



22

Fig. 21. Structure de la fonte grise (Mostki, XIX-ème siècle): graphite lamelaire, perlite, petites quantités de ferrite et l'eutectique phosphorique. Attaque nital, grossissement 100 ×.

Fig. 22. Structure de la fonte partiellement blanchie (la balle de Samsonow, XIX-ème siècle): graphite, perlite, cementite et eutectique phosphorique. Attaque nital, grossissement 100×.

la structure du métal on peut observer de petites quantités de la perlite.

Le fer affiné était par la suite transformé en acier par la carburation à l'aide de charbon de bois (cementation); en dehors de celà on obtenait parfois l'acier lorsque dans le foyer d'affinerie la décarburation de la fonte n'était pas suffisante; il est probable que ce dernier procédé était appliqué dans l'industrie très rarement. La fig. 20 présente la structure de l'acier affiné.

A cette époque de même que pendant les périodes La Tène et romaine, les outils étaient fabriqués entièrement en acier. C'était possible, parce que la production de fer dans un haut fourneau était bien plus productive que la production dans un four à loupes et permettait une production de l'acier en grande quantité.

Pour les moules on se servait en général de la fonte grise (fig. 21). Parfois on obtenait la structure blanchie (fig. 22) particulièrement avant qu'on s'était assimilé le procédé de la coulée de la fonte grise. Déjà vers la fin du XVIII-ème siècle dans la Haute Silésie, et au début du XIX-ème siècle sur d'autres territoires de Pologne on avait introduit dans l'industrie la fusion de la fonte dans des cubilots [34]. La fonte fusée au cubilot à cette époque ne différait pas beaucoup de la fonte du haut fourneau; parfois elle contenait moins de carbone et un peu plus de souffre. Nous observons un plus grand accroissement de la teneur en souffre dans la fonte fusée au cubilot après qu'on ait remplacé le charbon de bois par le coke.

Le développement de la technologie des produits de fer en Pologne présenté ci-dessus n'est qu'une synthèse pour l'établissement plus exact du temps dans lequel apparaissaient les genres respectifs de la technologie dans différentes régions de la Pologne.

Toutefois les examinations des anciens produits de fer ne peuvent pas se limiter à un seul pays et il est absolument nécessaire d'entreprendre les examinations analogues dans les autres pays d'Europe. Il serait indiqué qu'on applique aussi dans ces travaux des méthodes semblables des recherches pour faciliter une comparaison et une généralisation des résultats.

---

[34] K. Gierdziejewski, *Zarys dziejów odlewnictwa polskiego*, Katowice 1954.

Table 1

RÉSULTATS DE L'ANALYSE CHIMIQUE QUANTITATIVE DES ÉCHANTILLONS DE MINERAI ET DE LAITIER TROUVÉS EN POLOGNE

No	Objet	Provenance		Composition chimique, %								
		Lieu	Date	FeO	Fe_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	P_2O_5	MnO	Al_2O_3	S
1	Minerai	Tum près de Łęczyca	XII—XIII siècle	26,00	33,57	24,25	1,86	0,19	0,65	0,39	11,53	0,00
2	Laitier de four à loupes	Wyciąże	La Téne	55,24	14,73	18,85	2,71		1,37		1,56	
3	Laitier de four à loupes	Igołomia	La Tène	57,26	16,37	17,45	9,43		2.85		1,06	
4	Laitier de four à loupes	Tum près de Łęczyca	XII—XIII siècle	46,68	18,98	17,50	2,61	0,16	0,70	0,77	6,46	0,00
5	Laitier de four à loupes	Gdańsk	XIII siecle	52,24	16,13	14,76	4,51	0,74	2,11	0,25	1,24	
6	Laitier de haut fourneau	Węgierska Gorka	moitiè du XIX-e śiécle	1,15	1,07	43,58	33,8	6,05	0,07	1.15	8,26	0,43

Table 2

RÉSULTATS DE L'ANALYSE QUANTITATIVE SPECTROGRAPHIQUE DES ÉCHANTILLONS DE MINERAI ET DE LAITIER TROUVÉS EN POLOGNE

No	Type d'échantillon	Provenance		Analyse qualitative *)														
		Lieu	date (siècle)	Al	As	B	Ba	Ca	Cr	Cu	Mg	Na	Ni	Pb	Sn	Ti	V	Zn
1	Minerai	Tum près de Łęczyca	XII—XIII	+		?	+	?	+	+	?	+	+	0		?	+	0
2	Laitier de four à loupes	,,	,,	+	0	?	+	+		+	+		+	0	0	?		+
3	Laitier de four à loupes	Gdańsk	XIII	+		?	+	+		+	+			0	0	?		+

* En raison de la présence des quelques éléments résiduels dans l'électrode sur laquelle on avait placé l'échantillon, il était impossible de constater la présence du bore, du calcium, du magnesium, du titane dans le minerai et celle du bore et du titan dans les laitiers.

RÉSULTATS DE L'ANALYSE CHIMIQUE QUANTITATIVE DE CERTAINS PRODUITS TROUVÉS EN POLOGNE Table 3

No	Objet	Provenance		Composition chimique, %								
		Lieu	Date (pèriode)	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	Cr	Mo
1	Loupe	Przybysław	Halstadt		0,00	0,00	0,26		0,00			
2	Faucille	Biskupin	550—400 av. J. C.		0,00	0,00	0,36					
3	Bracelet	—„—	—„—		0,00	0,00	0,05		0,00			
4	Faux	Wyciąże	II—I siècle av. J. C.				0,43		0,00			
5	Epée	Jadowniki Mokre	I siècle av. J. C.		0,00	0,00	0,04		0,02			
6	Eperon	—„—	II siècle après J.C.	0,76	0.00	0,05	0,08					
7	Fer de lance	Szwajcaria	III—IV siècle après J. C.		0,09	0,00	0,08		0,02			
8	Couteau	Lutomiersk	XI siècle après J. C.									
	bande d'acier				0,00	0,00	0,25					
	flipot de fer				0,00	0,00	0,35					
	bande de fer				0,00	0,14	0,21		0,00			
9	Couteau	Piekary	XIII siècle après J. C.									
	bande d'acier						0,06					
	bande de fer			0,06	0,05	0,23	0,35		0,00			
10	Fonte	Mostki	XIX siècle après J. C.	3,53	0,88	0,39	0,37	0,020	0,00	0,00	0,00	0,00
11	Fonte fusée au cubilot	Samsonow	XIX siècle après J. C.	4,32	0,56	0,93	0,33	0,052	0,00	0,00	0,00	0,00
12	Fonte	Samsonow	moitié du XIX siécle	3,60	1,65	0,33	0,34	0,064	0,00	0,00	0,00	0,00
13	Fonte grise fusée au cubilot	Węgierska Górka	—„—	3,32	2,48	1,07	0,65	0,026	0,00	0,00	0,00	0,00
14	Clou	Sielpia	—„—	0,11	0,03	0,32	0,03	0,074	0,00	0,00	0,00	0,00

RESULTATS DE L'ANALYSE QUALITATIVE SPECTROGRAPHIQUE DE CERTAINS PRODUITS DE FER TROUVÉS EN POLOGNE

Table 4

No	Désignation	Provenance		Analyse qualitative												
		Lieu	Date (période)	Al	As	Ba	Bi	Ca	Cr	Cu	Mg	Ni	Pb	Sn	Ti	Zn
1	Loupe	Przybysław	Halstatt	+	0	0	+	+		+	+	+	+	+	0	+
2	Faucille	Biskupin	550—400 avant J. C.	+	0	+	+	+		+	+	+	+	+		+
				+	0											
3	Bracelet	Biskupin	550—400 avant J. C.	+	+	0	+	+		+	+	+	+	+	0	+
4	Faux	Wyciąże	II—I siécle av. J. C.	+	0		+	+		+	+		+	+		+
5	Epée	Jadowniki Mokre	I siécle av J. C.	+	0			+		0	+	+	+	+	0	+
6	Eperon	Jadowniki Mokre	II siécle aprés J. C.	+	0	0		+		+	+	+		+	0	+
7	Fer de lance	Szwajcaria	III—IV siécle aprés J. C.	+	0		0	+		+	+	+	+	+	?	0
8	Couteau	Lutomiersk	XI siécle													
	bande d'acier			+	+			+		+	+	+	+	+	0	+
	flipot de fer			0	+			0		+	+	+	0	0	0	+
	bande de fer			+	+			+		+	+	+	+	+	0	+
9	Couteau	Piekary	XIII siécle													
	bande d'acier			+	+	0			+	+	+	+	0	+		+
	bande de fer			+	+	0			+	+	+	+	0	+		+

Table 5

RÉSULTATS DES OBSERVATIONS MÉTALLOGRAPHIQUES ET DES MESURES DE LA MICRODURETÉ ET DE DURETÉ DE CERTAINS PRODUITS DE FER TROUVÉS EN POLOGNE

No	Objet	Composants de la structure	Classe de grosseur du grain	Microdureté Hm kG/mm²	Dureté de Vickers kG/mm²
1	Loupe (Przybysław)	ferrite	3	128	89,6
2	Faucille (Biskupin)	ferrite	5	199	149,7
3	Bracelet (Biskupin)	perlite	6	317	
		ferrite*			238
4	Faux (Wyciąże)	martensite**		733	
		ferrite	3	210	165
5	Epée (Jadowniki	ferrite	5	147	} 110
	Mokre)	perlite	7	283	
6	Eperon (Jadowniki	perlite	4	303	} 213
	Mokre)	ferrite	6	153	
7	Fer de lance	ferrite	7	134	} 102,7
	Szwajcaria)	ferrite	4	126	
	Couteau (Lutomiersk)				
8	bande d'acier	martensite		632	890
	flipot de fer	ferrite	2	237	185
	bande de fer***	perlite	5	314	281
		ferrite	6	181	147,1
9	Couteau (Piekary)	martensite		562	473
	bande d'acier	troostite		412	407
	bande de fer	sorbite****		329	224
		ferrite	1—2	249	174

* Sur les limites des grains.

** Dans la couche carburée.

*** Spécialement carburée pour faciliter le procédé de soudage.

**** Dans la couche carburée à la suite de la diffusion du carbon de la bande en acier dans le fer au cours du soudage.