

Analizy wytrzymałościowe podków wykonanych z wykorzystaniem technik odlewniczych

Strength analysis of horseshoes made using casting techniques

Piotr Dudek^{1*}, Robert Żuczek¹, Mirosław Kaźmierczak², Michał Trojanowski²

¹Instytut Odlewnictwa, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Polska

²Ti-CON, ul. Aleja Bzów 9/2, 05-500 Józefosław, Polska

¹Foundry Research Institute, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Poland

²Ti-CON, ul. Aleja Bzów 9/2, 05-500 Józefosław, Poland

*Corresponding author: piotr.dudek@iod.krakow.pl

Received: 24.08.2018. Accepted in revised form: 30.11.2018.

© 2018 Instytut Odlewnictwa. All rights reserved.

DOI: 10.7356/iod.2018.13

Streszczenie

W artykule przedstawiono fragment wyników prac B+R realizowanych w Instytucie Odlewnictwa dotyczących opracowania nowoczesnych tworzyw odlewniczych ze stopów żelaza i metali nieżelaznych do wykonywania podków o zwiększonej trwałości. Przedstawiono problemy związane z opracowaniem modelu ruchu konia i mechaniki kopyta. Na podstawie ogólnie dostępnych danych przeprowadzono analizy wytrzymałościowe podków wykonanych z wykorzystaniem technik odlewniczych.

Słowa kluczowe: podkowa, analiza wytrzymałościowa, stopy aluminium, stopy żelaza

Abstract

The article presents a fragment of results of R&D works carried out at the Foundry Research Institute concerning the development of modern casting materials from ferrous and non-ferrous alloys to make horseshoes with increased durability. Problems related to the development of the horse's movement model and hoof mechanics are presented. On the basis of generally available data, strength analyzes of horseshoes made using castings techniques were carried out.

Keywords: horseshoe, strength analysis, aluminum alloys, iron alloys

1. Wprowadzenie

Od współczesnych materiałów inżynierskich wymaga się złożonego kompleksu właściwości, które można uzyskać poprzez właściwy dobór materiału do danego zastosowania w oparciu o wielokryterialną optymalizację związaną z jego składem chemicznym, warunkami i kosztami wytwarzania, obróbką wykańczającą oraz warunkami eksploatacji wytworzonego elementu. W trakcie użytkowania w strukturze materiałów inżynierskich i na ich powierzchni następują istotne zmiany, spowodowane czynnikami zewnętrznymi i warunkami eksploatacji. Jednym z najczęściej spotykanych w technice zużyciem związanym z eksploatacją jest zużycie tribologiczne, w którym następuje zmiana masy oraz

1. Introduction

Modern engineering materials require a complex set of properties that can be obtained by selecting the right material for a given application based on itfor multicriteria optimization related to its chemical composition, production conditions and costs, finishing and operating conditions of the manufactured element. During use, significant changes occur in the structure of engineering materials and on their surface, caused by external factors and operating conditions. One of the most frequent wear and tear associated with exploitation is tribological wear, in which there is a change in the mass and structure and physical properties of the outer layers of the contact areas. Tribological mechanisms, caused by

struktury i fizycznych właściwości warstw wierzchnich obszarów styków. Mechanizmy tribologiczne, wywoływane procesami tarcia, stanowią około 80% ogółu wszystkich przypadków zużycia i uszkodzenia [1].

Wciąż poszukiwane są materiały, który charakteryzowałyby się równocześnie maksymalnie możliwą odpornością na zużycie w warunkach pracy oraz wysoką plastycznością. Takie połączenie właściwości jest bardzo trudne do uzyskania. Jednym z produktów pracujących w ekstremalnie zmiennych warunkach jest podkova służąca do podkuwania koni. Jej eksploatacja wymaga, aby spełniała ona szeroki zakres właściwości – dużą odporność na ścieranie i korozję w obecności związków mocznikowych, dużą udarność, stabilność właściwości w zmiennej temperaturze i odpowiednie właściwości antypoślizgowe (przyczepność do zmiennego podłoża), dobrą plastyczność i kowalność oraz powinna być tania w produkcji. Obecnie najczęściej stosuje się podkwy stalowe, jednakże coraz częściej stosuje się kute podkwy ze stopów aluminium i tytanu, zwłaszcza w sporcie jeździeckim i w leczeniu schorzeń kopyt.

Podkova ma na celu zabezpieczenie kopyta przed nadmiernym ścieraniem się oraz przed urazami. W trakcie poruszania się zwierzę ściera róg kopytowy. Szybkość ścierania rogu kopytowego zależy m.in. od rodzaju nawierzchni drogi. W naturalnych warunkach koń porusza się po różnym podłożu, równomiernie ścierając kopyta ze zmienną charakterystyką w zależności od właściwości tego podłoża.

W Instytucie Odlewnictwa realizowano prace B+R związane z opracowaniem nowych tworzyw odlewniczych ze stopów żelaza oraz metali nieżelaznych przeznaczonych do wykonywania podków z wykorzystaniem technik odlewniczych. Prace były prowadzone we współpracy z firmą Ti-CON sp. z o.o. Opracowanie nowych tworzyw na podkwy wymaga m.in. poznania zjawisk zachodzących podczas ruchu konia.

Rozpatrując mechanikę przód–tył, kopyto może lądować na ziemi na trzy sposoby: uderzając o podłoże najpierw przednią częścią („od palca”), płasko lub najpierw tylną częścią („od piętki”). Większość koni porusza się od palca (rys. 1).

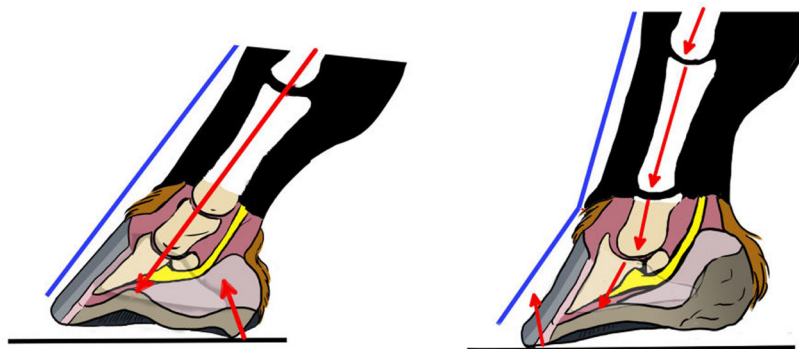
friction processes, account for about 80% of all wear and damage cases [1].

Material is still being sought, which would also be characterized by the maximum possible resistance to wear under working conditions and high plasticity. This combination of properties is very difficult to obtain. One of the products working in extremely variable conditions is the horseshoe used for shoeing horses. Its operation requires that it has a wide range of properties – high resistance to abrasion and corrosion in the presence of urea compounds, high impact strength, provide stability properties at variable temperatures and adequate anti-slip properties (adhesion to variable substrate), good plasticity and malleability and should be cheap to produce. At present, the most popular are steel horseshoes, however, forged horseshoes are increasingly used in aluminum alloys and titanium, especially in equestrian sport and in the treatment of hoof diseases.

The horseshoe is designed to protect the hoof from excessive abrasion and injury. As the animal moves, the hoof horn rubs. The speed of hoof horn abrasion depends on from the type of road surface. In natural conditions, the horse moves on various substrates, evenly rubbing the hooves with variable characteristics depending on the properties of the substrate.

In the Foundry Research Institute, R&D works related to the development of new casting materials from iron alloys and non-ferrous metals intended for the making of horseshoes were carried out using casting techniques. The work was carried out in cooperation with the company Ti-CON Ltd. The development of new materials for the horseshoe requires, among others learning about the phenomena occurring during the movement of the horse.

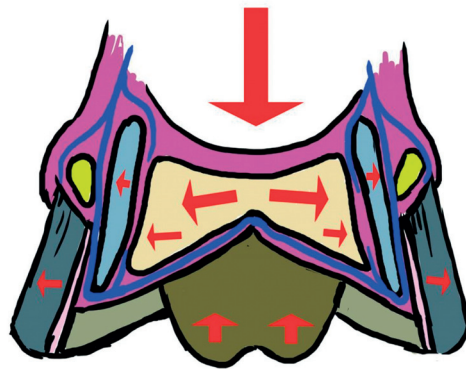
When considering the front-rear mechanics, the hoof can land on the ground in three ways: by hitting first the front part (“from the finger”), flat or first with the back part (“from the heel”). Most horses move from the finger (Fig. 1).



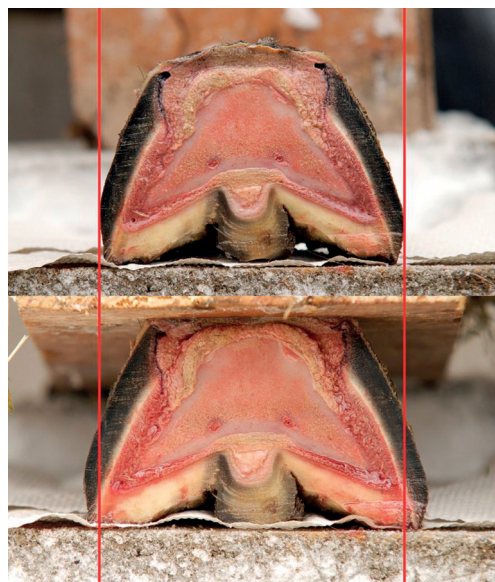
Rys. 1. Porównanie sił działających przy uderzeniu „od piętki” i „od palca” [2]
Fig. 1. Comparison of forces acting on the “from the heel” and “from the finger” [2]

Kopyto końskie jest sprężyste i elastyczne. Uderzając o podłoże, zmienia swój kształt, dopasowując się do obciążeń (rys. 2). Kopyto przy obciążeniu rozszerza się, a nieobciążone zwęża (rys. 3). Główną siłą, która powoduje to odkształcenie, jest ciężar konia działający na wklęsłą podszewę. Brak jest dokładnych badań, jak duże odkształcenie jest potrzebne dla prawidłowego funkcjonowania, według [2] jest to około 6–12 mm w poziomie, co powoduje „spłytenie” podszewy około 6 mm w pionie. Natomiast [3] podaje, że ściany kopyta rozszerzają się (nawet do 10 mm na boki), a podszewa rozplaszcza. Wartości te zależą oczywiście również od rodzaju podłoża, do którego przystosowało się kopyto.

The horse's hoof is springy and elastic. Striking the ground, it changes its shape, adapting to the loads (Fig. 2). The hoof under load expands and narrows when it is unencumbered (Fig. 3). The main force that causes this deformation is the weight of the horse acting on the concave sole. There is no detailed research on how much deformation is needed for proper functioning, according to [2] it is about 6–12 mm horizontally, which causes the sole to “flatten out” about 6 mm vertically. However, [3] reports that the hoof walls widen (up to 10 mm to the sides) and the sole flattens. Of course, these values also depend on the type of substrate to which the hoof has adapted.



Rys. 2. Przenoszenie energii uderzenia o ziemię [2]
Fig. 2. Transfer of impact Energy the ground [2]



Rys. 3. Przyłożone obciążenie (160 kg) powoduje rozszerzenie kopyta i „obniżenie” podszewy [2]
Fig. 3. The applied load (160 kg) extends the hoof and “lowering” the sole [2]

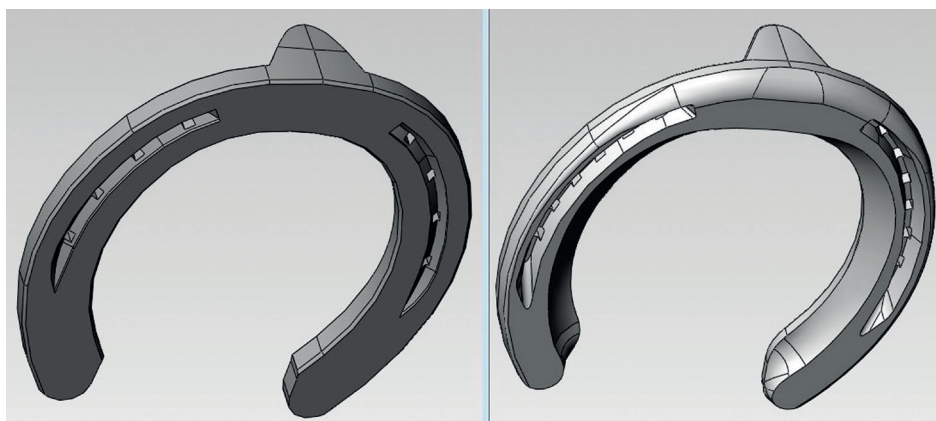
Działanie kopyta polega zatem na ciągłym, powtarzalnym rozszerzeniu i zwężaniu puszki kopytowej. Mechanizm ten służy amortyzacji uderzenia, które jest wspomagane przez krążącą w tworzywie kopytowym krew, spełniająca rolę amortyzatora hydraulicznego.

The operation of the hoof is thus a continuous, repeatable extension and narrowing of the hoof box. This mechanism is used to cushion the shock, which is assisted by circulating in the hoof material, blood, acting as a hydraulic damper.

2. Analizy wytrzymałościowe podków wykonanych z wykorzystaniem technik odlewniczych

Analizy danych literaturowych [2–3] oraz dostępnych tutoriali programów symulacyjnych, jednoznacznie wskazują, iż aspekt analiz numerycznych wykorzystujących pracę kopyta końskiego oraz jego współpracę z podkowami (metalowymi czy z tworzyw sztucznych) nie jest szeroko badany. Określenie prawidłowej pracy kopyta oraz odpowiednio dobranych podków ma niebagatelne znaczenie dla prawidłowej pracy kończyn.

Przeprowadzone analizy numeryczne sposobu eksploatacji podków przedstawiono na przykładzie dwóch modeli odlewów opracowanych w programie CAD 3D, jako model podkowy wykonanej ze staliwa oraz stopu aluminium. Opracowane modele bryłowe przedstawiono na [rysunku 4](#).



Rys. 4. Modele 3D podków: stalowej (lewa) oraz ze stopu aluminium (prawa)

Fig. 4. 3D models of horseshoes: steel (left) and aluminum alloy (right)

Wszystkie analizy numeryczne sprowadzają się do określenia warunków brzegowych działających na obciążony element, najbardziej zbliżonych do rzeczywistych warunków pracy konstrukcji [4,5]. Ze względu na brak pełnej charakterystyki kinematyki ruchu kopyta wraz z podkową w trakcie normalnego ruchu konia, jak również braku możliwości uwzględniania indywidualnej pracy kończyny, do analiz numerycznych przyjęto następujące założenia:

1. Obciążenie podkowy siłą wypadkową o wartości nieprzekraczającej 3000 N – jest to siła odpowiadająca stąpieniu konia o masie około 600 kg, rozłożona na dwie kończyny.
2. Zamodelowano kształt kopyta, w celu umiejscowienia punktu przyłożenia siły obciążającej, bez uwzględnienia konieczności analiz numerycznych sposobu obciążania tego kopyta.
3. Przyjęto trzy modele obciążania podków:

2. Strength analysis of horseshoes made using casting techniques

Analizes of literature data [2–3] and available tutorials on simulation programs, unambiguously indicate that the aspect of numerical analyzes using the work of the horse's hoof and its cooperation with horseshoes (metals or plastics) is not widely studied. Determining the correct work of the hoof and carefully selected horseshoes is of great importance for the proper operation of the limbs.

The numerical analyzes of the method of horseshoe service were presented on the example of two casting models developed in the 3D CAD program, as a horseshoe model made of cast steel and aluminum alloy. The developed solid models are shown in [Figure 4](#).

All numerical analyzes boil down to determining the boundary conditions acting on the loaded element, the closest to the actual working conditions of the structure [4,5]. Due to the lack of full characteristics of the movement kinematics hooves and horseshoes during the normal movement of the horse, as well as the inability to take into account the individual work of the limb, the following assumptions were made for numerical analyzes:

1. Horseshoe load with a value up to 3000 N – this is the force corresponding to the treading of a horse weighing approximately 600 kg, spread over two limbs.
2. The shape of the hoof was modeled in order to locate the point of application of the loading force, without taking into account the necessity of numerical analysis of the method of loading this hoof.
3. Three models of horseshoe loading were adopted:

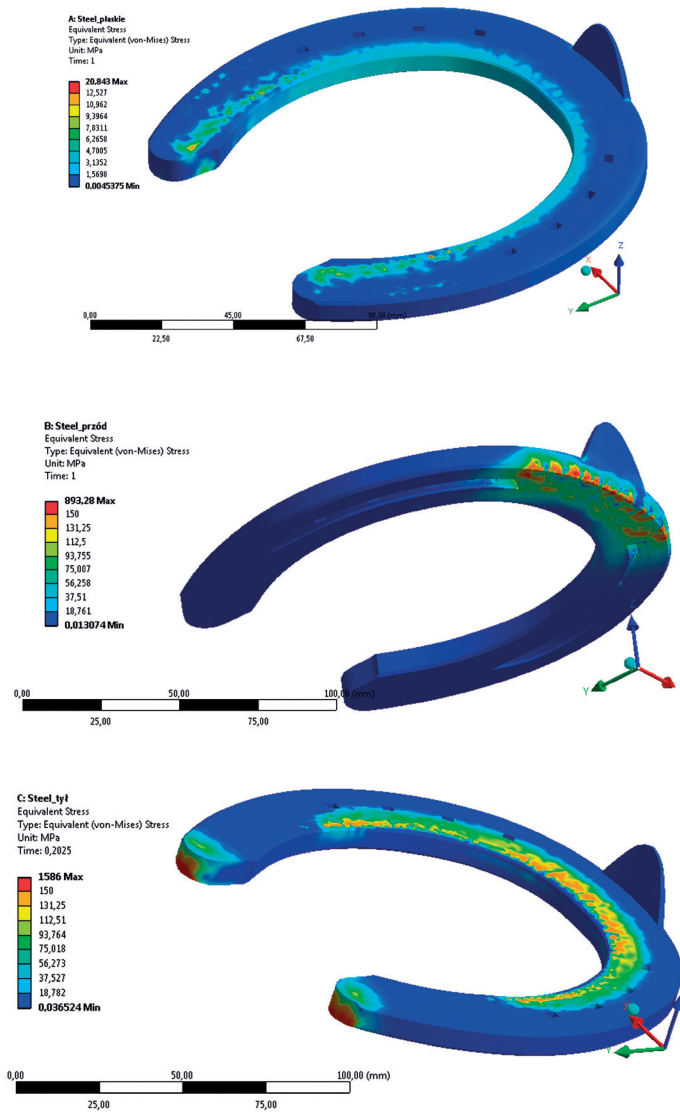
- wariant 1: obciążenie prostopadłe do podłoża,
- wariant 2: obciążenie podkowy przy założeniu stąpania konia „od palców” (kąt 15°),
- wariant 3: obciążenie podkowy przy założeniu stąpania konia „od piętki” (kąt 15°),

4. Założono materiał podkowy: staliwo odpowiadające właściwościami wytrzymałościowymi stopowi 30NSCDV86-M1 oraz stop aluminium odpowiadający stopowi aluminium 7022.

4. Horseshoe material was established: cast steel corresponding to strength properties of 30NSCDV86-M1 alloy and aluminum alloy corresponding to aluminum alloy 7022.

W pierwszych iteracjach analiz numerycznych przyjęto model obciążania podkowy stalowej dla wybranych wariantów obciążania podkowy. Szacowane rozkłady naprężeń zredukowanych dla wybranych schematów obciążania przedstawiono na rysunku 5.

In the first iterations of numerical analyzes, a model of loading a steel shoe for selected horseshoe charging variants was adopted. The estimated reduced stress distributions for selected load patterns are shown in Figure 5.



Wariant 1

Wariant 2

Wariant 3

Rys. 5. Rozkład naprężeń zredukowanych w stalowym modelu podkowy dla wybranych wariantów obciążania siłą od ciężaru konia w trakcie ruchu swobodnego

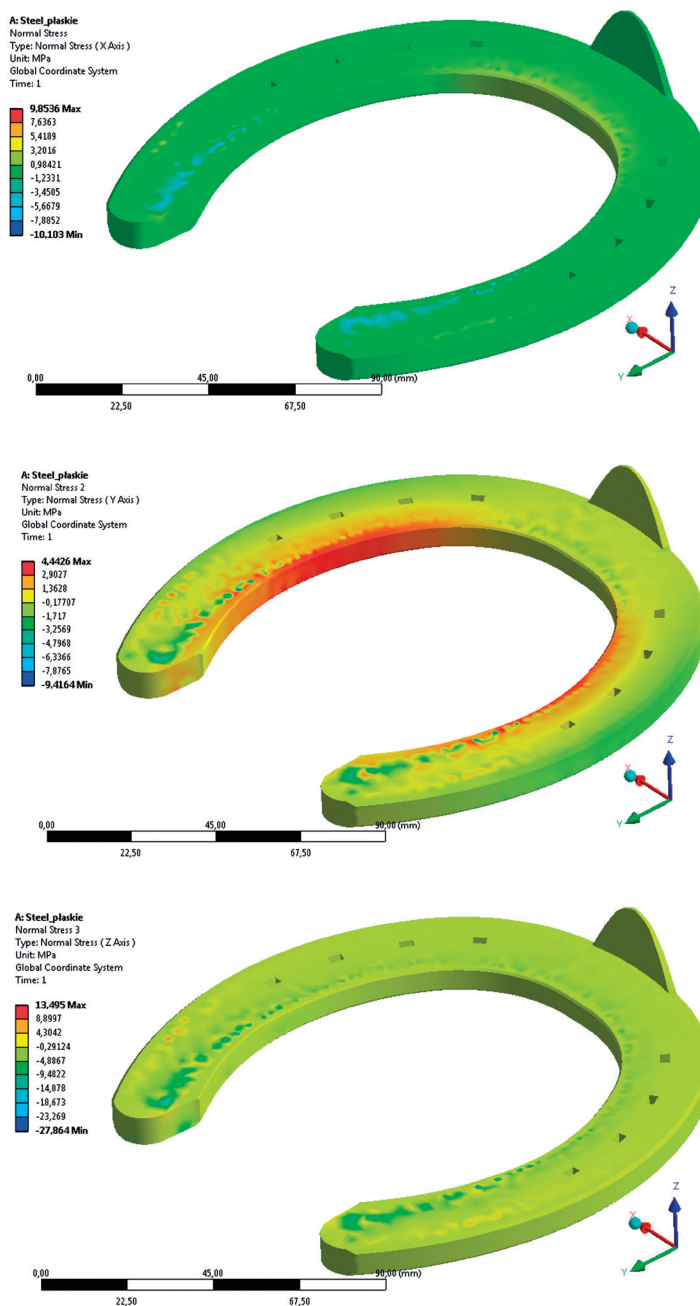
Fig. 5. The distribution of reduced stresses in a steel horseshoe model for selected variants of the force load on the horse's weight during free movement

Dokładniejsze analizy rozkładu naprężeń przedstawione zostały na rysunkach 6–8, gdzie uwzględniono rozkłady pól naprężeń normalnych wzdłuż osi głównych przyjętego globalnego układu współrzędnych.

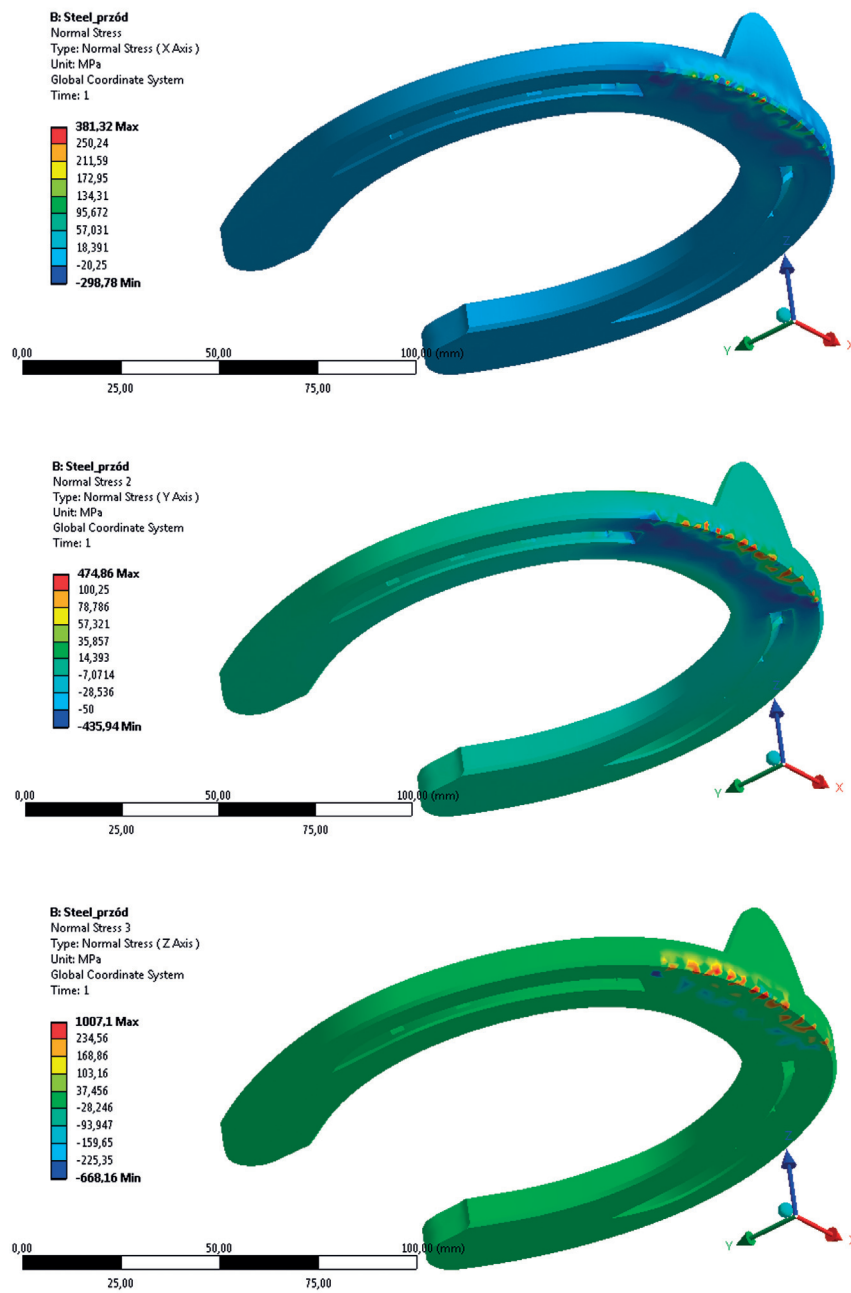
Rozkład przemieszczeń uogólnionych wskazuje na silne deformacje podkowy mogące wystąpić w trakcie obciążania podkowy według wariantu 2 i 3. Szacowane pola rozkładu tych przemieszczeń przedstawiono na rysunku 9.

More detailed analyzes of the stress distribution are presented in Figures 6–8, where the distributions of fields the normal stresses along the main axes of the adopted global coordinate system are taken into account.

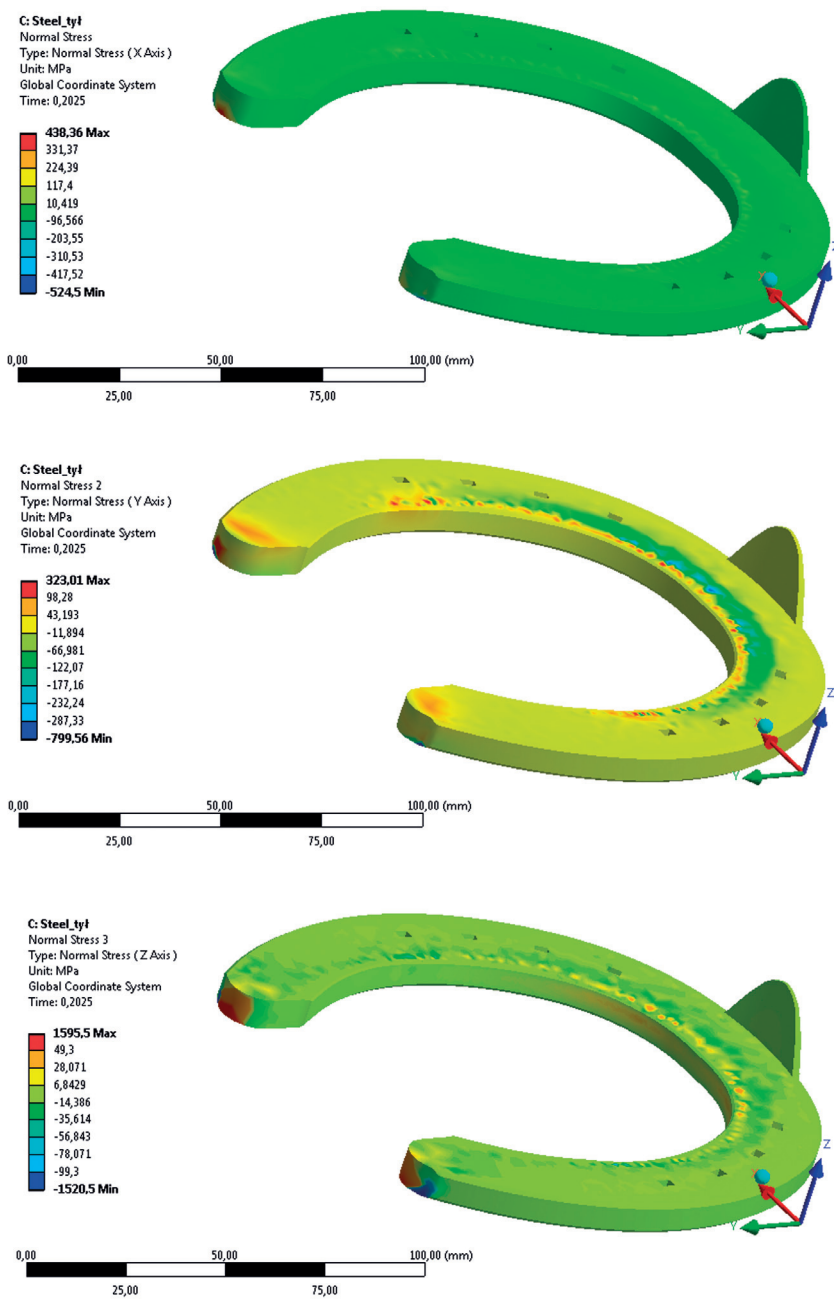
The distribution of generalized displacements indicates a strong deformation of the horseshoe that may occur when horseshoes are loaded according to variant 2 and 3. The estimated distribution fields for these displacements are shown in Figure 9.



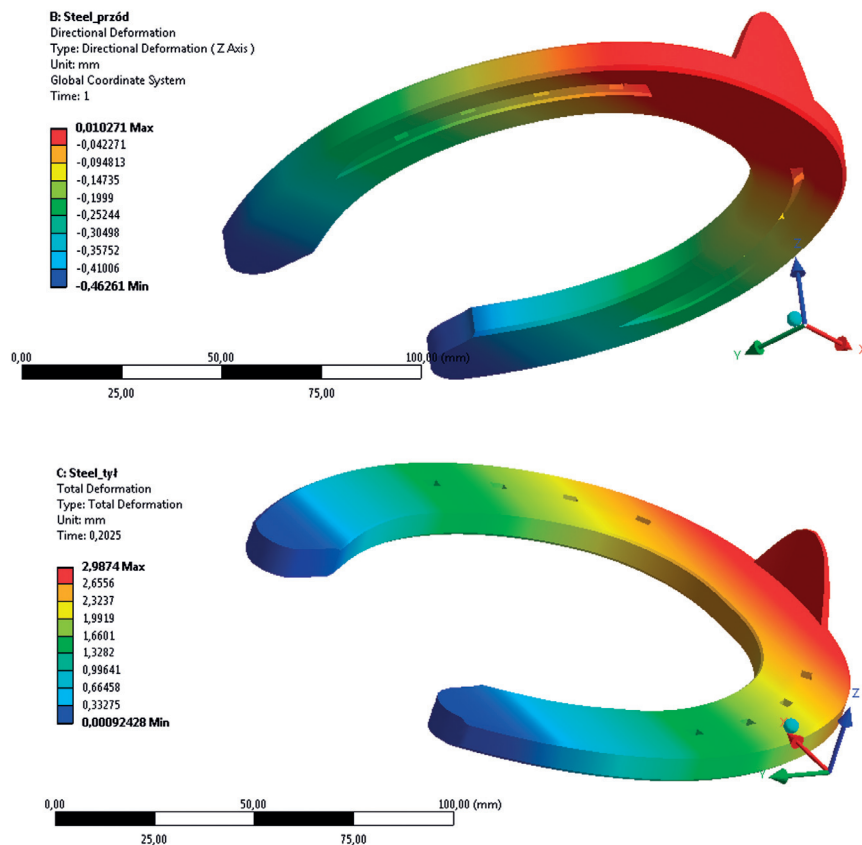
Rys. 6. Rozkład naprężeń normalnych dla wariantu nr 1 obciążania podkowy
 Fig. 6. Distribution of normal stresses for variant No. 1 of horseshoe loading



Rys. 7. Rozkład naprężeń normalnych dla wariantu nr 2 obciążania podkowy
Fig. 7. Distribution of normal stresses for variant No. 2 of horseshoe loading



Rys. 8. Rozkład naprężeń normalnych dla wariantu nr 3 obciążania podkowy
Fig. 8. Distribution of normal stresses for variant No. 3 of horseshoe loading



Rys. 9. Rozkład przemieszczeń uogólnionych w stalowym modelu podkowy dla wariantu 2 i 3 obciążania w trakcie uderzenia kopyta „od palca” oraz „od piętki”

Fig. 9. Distribution of generalized displacements in a steel model of a horseshoe for variant 2 and 3 of loading during the impact of the hoof “from the finger” and “from the heel”

Dla wybranych, najbardziej newralgicznych wariantów obciążania podkowy przygotowano szacunkowy rozkład współczynnika bezpieczeństwa materiału podkowy, rozumiany jako stosunek maksymalnej wartości granicy plastyczności materiału podkowy odniesiony do maksymalnego naprężenia występującego w materiale w trakcie obciążania zakładaną siłą.

Rozkład szacowanego współczynnika bezpieczeństwa materiału przedstawiono na rysunku 10.

Przeprowadzone analizy pozwalają stwierdzić, że nadmierne zużycie podkowy następuje głównie w przedniej jej części przy uderzeniu kopyta „od palców” oraz w tylnej części przy uderzeniu kopyta „od piętki”. Omówione obszary są najbardziej narażone na zużycie cierne, a wartości naprężeń znacznie przekraczają dopuszczalne wartości wytrzymałości materiału podkowy.

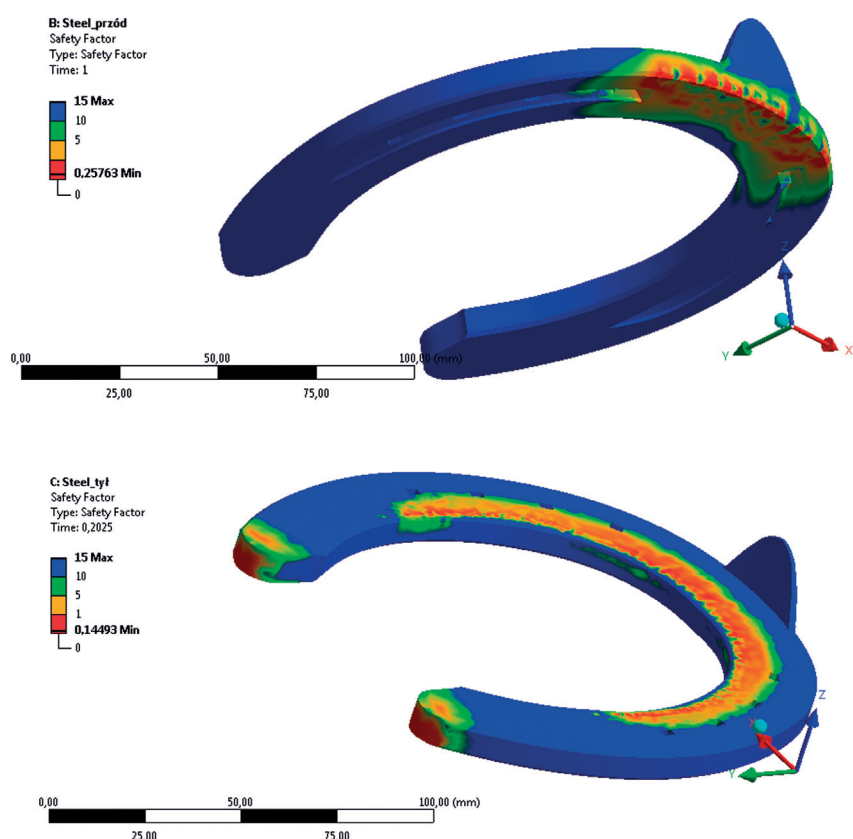
Podobne analizy przeprowadzono dla podków aluminiowych, pozwalając oszacować maksymalne wartości naprężeń występujących w odlewie podczas zakładanego cyklu eksploatacji podkowy, przy założonej sile obciążającej pochodzącej od uderzenia nogi konia w podłoże.

For selected, the most neuralgic variants of horseshoe loading, an estimated distribution of the shoe material safety factor was prepared, understood as the ratio of the maximum value of the yield point of the horseshoe material referred to the maximum stress occurring in the material during loading with the assumed force.

The distribution of the estimated material safety factor is shown in Figure 10.

Analyses carried out allow to conclude that excessive use of horseshoes occurs mainly in the front part of the horseshoe when the hoof hits “from the fingers” and in the rear part when the hoof hits “from the heel”. The discussed areas are the most exposed to friction wear and the stress values significantly exceed the acceptable values of the effort of the horseshoe material.

Similar analyses were carried out for aluminum horseshoes, allowing to estimate the maximum values of stresses occurring in the cast during the assumed cycle of horseshoe exploitation, with the assumed load force coming from the horse's leg impact to the ground.

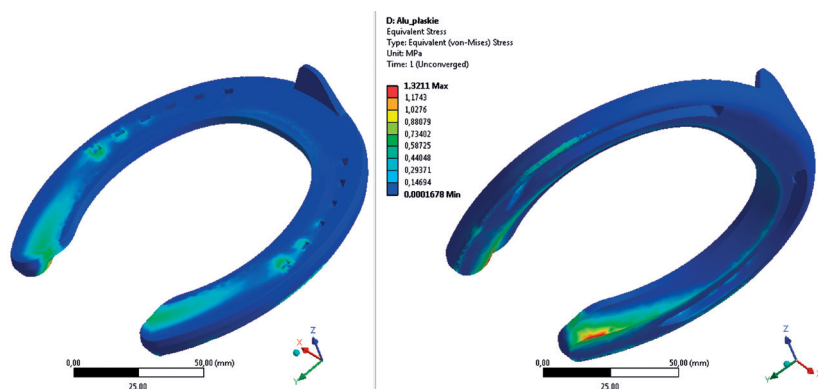


Rys. 10. Rozkład szacowanego współczynnika bezpieczeństwa materiału w stalowym modelu podkowy dla neuralgicznych wariantów 2 i 3 obciążenia przy uderzeniu kopyta „od palca” oraz „od piętki”

Fig. 10. Distribution of the estimated material safety factor in a steel model of the horseshoe for neuralgic variants 2 and 3 of loading at the impact of the “finger’s hoof” and “from the heel”

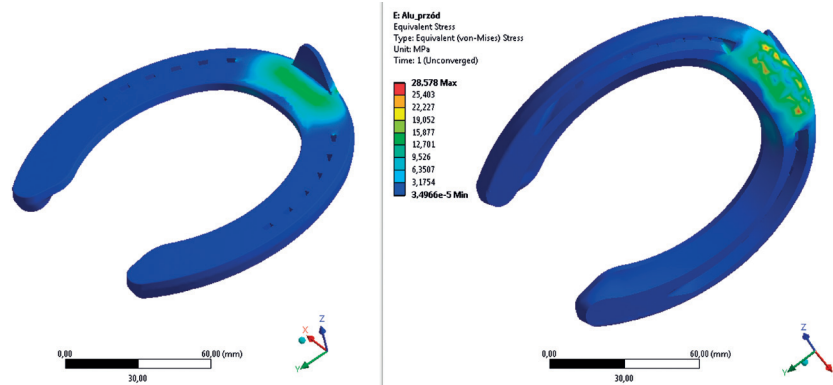
Analizy rozkładu naprężeń zredukowanych w aluminiowym odlewie podkowy przedstawiono na [rysunku 11](#) dla wariantu nr 1 obciążenia podkowy, natomiast na [rysunku 12](#) – dla wariantu 2. Rozkład szacowanych wartości przemieszczeń uogólnionych przedstawiono odpowiednio na [rysunku 13](#) (wariant nr 1) i [rysunku 14](#) (wariant nr 2).

Analyses of stress distribution in the aluminum casting of horseshoes are shown in [Figure 11](#) for variant 1 of horseshoe loading, while in [Figure 12](#) – for variant 2. The distribution of estimated values of generalized displacements is presented respectively in [Figure 13](#) (variant 1) and [Figure 14](#) (variant 2).



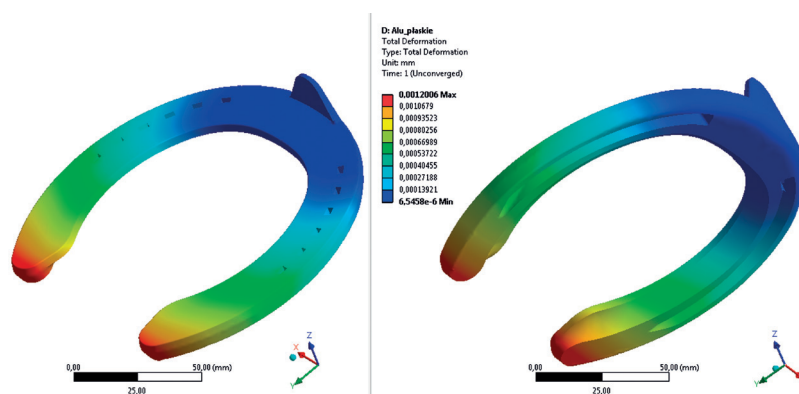
Rys. 11. Rozkład naprężeń zredukowanych w aluminiowym modelu podkowy dla pierwszego wariantu obciążenia (naprężenia zredukowane $\times 100$)

Fig. 11. Distribution of reduced stresses in the aluminum model of the horseshoe for the first load variant (reduced stresses $\times 100$)



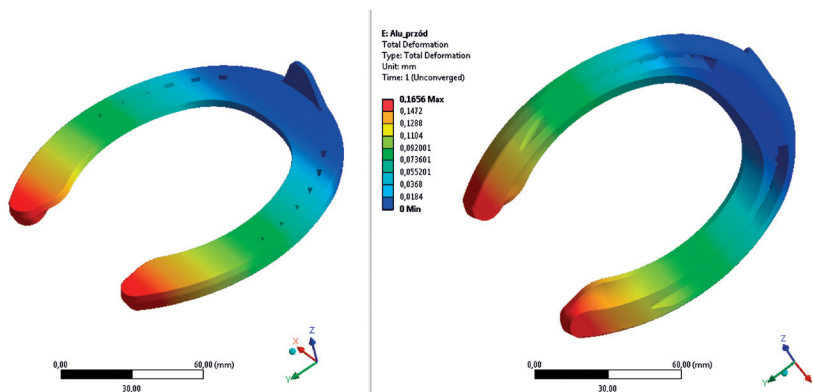
Rys. 12. Rozkład naprężeń zredukowanych w aluminiowym modelu podkowy dla drugiego wariantu obciążania (naprężenia zredukowane $\times 100$)

Fig. 12. Distribution of reduced stresses in the aluminum horseshoe model for the second load variant (reduced stresses $\times 100$)



Rys. 13. Rozkład przemieszczeń uogólnionych w aluminiowym modelu podkowy dla pierwszego wariantu obciążania (przemieszczenie $\times 100$)

Fig. 13. Distribution of generalized displacements in the aluminum model of the horseshoe for the first load variant (displacement $\times 100$)



Rys. 14. Rozkład przemieszczeń uogólnionych w aluminiowym modelu podkowy dla drugiego wariantu obciążania (przemieszczenie $\times 100$)

Fig. 14. Distribution of generalized displacements in the aluminum horseshoe model for the second load variant (displacement $\times 100$)

3. Analiza wyników

Przeprowadzone analizy numeryczne jednoznacznie wskazują obszary o znacznie przekroczonych dopuszczalnych wartościach wyężenia materiału dla proponowanej odlewanej konstrukcji podkowy. Najbardziej narażone na zużycie cierne obszary podkowy występują w jej tylnej części oraz na nosie podkowy, w jej dolnej strefie. Przeprowadzone analizy wskazują, że konieczne staje się dodatkowe wzmocnienie omawianych stref, zwłaszcza w przypadku odlewów ze stopu aluminium, poprzez zastosowanie dodatkowych wtopek z wysokowytrzymałego staliwa lub żeliwa odpornego na zużycie cierne.

Podziękowania

Praca powstała na podstawie wyników badań B+R realizowanych w ramach Bonu na Innowację, zleconych przez firmę Ti-CON sp. z o.o.

3. Analysis of results

Numerical analyzes carried out clearly indicate areas with significantly exceeded permissible values of material effort for the proposed casted structure of the horseshoe. The most vulnerable areas of the horseshoe are found in its rear part and on the nose of the horseshoe, in its lower zone. The analyzes carried out indicate that it is necessary to further strengthen the discussed zones, especially in the case of aluminum alloy castings, through the use of additional insert part of high-strength cast steel or cast-iron resistant to friction wear.

Acknowledgements

The work was based on the results of R&D carried out as part of the Innovation Voucher, commissioned by the company Ti-CON Ltd.

Literatura/References

1. Dobrzański L.A., A.D. Dobrzańska-Danikiewicz. 2011. „Obróbka powierzchni materiałów inżynierskich”. *OPEN ACCESS LIBRARY. Scientific International Journal of the World Academy of Materials and Manufacturing Engineering publishing scientific monographs in Polish or in English only* 5 : 7–14.
2. <http://konie.rancho-stokrotka.pl/2014/10/18/jak-powinien-poruszac-sie-twoj-kon-2> [dostęp: 08.08.2018].
3. Kozłowska A. Koń w butach czyli tajemnice kopyta. Część I. Pobrane z: http://www.pdmpromocja.pl/jnbt/public/cache/uploads/Kon_w_Butach_czesc_1.pdf [dostęp 08.08.2018].
4. Zachura A., R. Żuczek. 2014. „Innovative design of a longwall shearer's haulage system with highly loaded components of a tribological pair manufactured according to the precise casting technology”. *Solid State Phenomena* 223 : 171–180.
5. Żuczek R., S. Pysz, M. Maj, J. Piekło. 2015. „Shaping the strength of cast rocker arm for special purpose vehicle”. *Archives of Foundry Engineering* 15 (3) : 95–98.